INVESTIGACION y CIENCIA

REACCIONES QUIMICAS CONTROLADAS POR LASER

BASES GENETICAS DEL CANCER

HERMANN HELMHOLTZ Y LA CIENCIA DE SU TIEMPO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



ROBOATUN

MAYO 1995
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Mayo de 1995 Número 224





SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. P. Campos: *Reacciones químicas controladas por láser*; Francesc Asensi Botet: *Hermann Helmholtz*; Santiago Torres: *Bases genéticas del cáncer*; Joandomènec Ros: *Vida social de los bonobos*; Luis Bou: *Ordenadores de base proteínica, Creaciones informáticas* y *Juegos matemáticos*; Ana M.ª Rubio: *Degradación del suelo en la Grecia antigua*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; José M. García de la Mora: *Ensayo*

Ciencia y sociedad:

Emilio Elizalde y Juan Pedro Campos

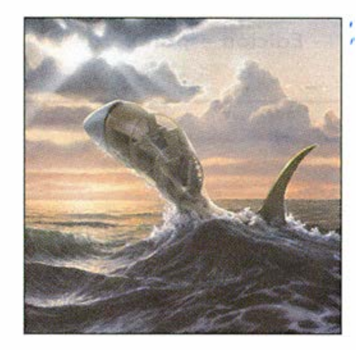
Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Al Kamajian

Página	Fuente
9	Ricki Rosen *SABA*
10-12	Dimitry Schidlovsky
17-27	Spektrum der Wissenschaft
28-31	Roberto Osti
32	Ian Worpole (*dibujo*); Dave Barrett (*fotografía*)
33-34	Sam Ogden
45-45	Tom Mikkelsen, Hospital Henry Ford, Detroit
47-48	Tomo Narashima (*arriba*); Jared Schneidman/JSD (*abajo*)
49	Jared Schneidman/JSD
50	Eric R. Fearon, Universidad de Yale, y Kathleen R. Cho, Universidad Johns Hopkins (*arriba*); Peter C. Nowell, Universidad de Pennsylvania (*abajo*)
51	Tom Mikkelsen
53	Frans Lanting, Minden Pictures
54-56	Laurie Grace
57	Suzanne Barnes
58	Frans Lanting, Minden Pictures
60-61	Barrie Rokeach (*fotografía*); Rick Gross y Deshan Govender (*inserto*); Tomo Narashima (*dibujo*)
62-63	Tomo Narashima (*arriba*); Michael Goodman (*abajo*)
64-65	Michael Goodman
67-73	María Luisa Calvo
75	Cortesía de la National Gallery of Art, Ailsa Mellon Bruce Fund
76	Jana Brenning
77	Eugene G. Schulz
84-85	G. Théraulaz, E. Bonaveau, S. Goss y J. L. Deneubourg
86-87	Documents PLS
88	G. Théraulaz, E. Bonaveau, S. Goss y J. L. Deneubourg
89-92	Documents PLS



La portada ilustra una concepción artística de un pez robotizado en natación libre. Se están desarrollando dispositivos precursores de tales máquinas para lograr entender de qué modo el pez aprovecha los principios de la mecánica de fluidos en su beneficio. Tal vez una nave robotizada basada en esos principios podría explorar el océano, mantener las plataformas flotantes y ejecutar misiones militares (*véase* "Robots de natación autónoma", por M. S. Triantafyllou y G. S. Triantafyllou, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada ojd

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A., Avila, 112-114 4ª pl. - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A., Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Una invención reciente en el campo de los plásticos y la electrónica es un disco de grabación de plástico vinílico, no más grueso que un barquillo, de sólo apenas dieciocho centímetros de diámetro. Cada cara del disco puede registrar del orden de quince minutos de dictado. Tales discos pueden doblarse, arrollarse, dejarse caer y escribirse con un lápiz sin que sufra la pista de sonido. Tan delgado plástico puede almacenarse indefinidamente sin que se alabee, se rompa o se deforme en un archivador ordinario, a razón de 40 unidades por centímetro, y ser reproducido por lo menos hasta cien veces.»

«Un nuevo tipo de motor diésel permitirá al usuario emplear combustibles tanto líquidos como gaseosos sin necesidad de encendido por chispa eléctrica y rebajará el consumo de combustible en los motores de gas hasta en un 25 por ciento. El ingenio funciona con una amplia variedad de combustibles: fuel oil, gas natural, gases de coque y sintéticos, gas metano y subproductos de refinerías. Además, el motor dará la misma economía de combustible cualquiera que sea el combustible utilizado.»

«Cuando en The Electric Auto-Lite Company surgió el problema del lavado de cojinetes, los expertos lo zanjaron recurriendo a un exprimidor de naranjas normal y corriente. Los cojinetes simplemente se colocan en el lugar que en otro caso ocuparían las naranjas y se rocían a continuación con aceite, mientras van dando vueltas dentro del recipiente. De éste los cojinetes se sacan con pinzas, nunca con manos humanas. El fluido de lavado mana del canalón.»

«En la nueva técnica de vulcanizado del caucho con control electrónico, una oscilación de alta frecuencia sacude las moléculas de caucho y azufre millones de veces por segundo, produciendo así el calentamiento uniforme de la masa del producto a vulcanizar en una fracción del tiempo necesario cuando se emplea vapor. Con este proceso electrónico ya se han vulcanizado colchonetas y almohadillas de goma macrocelular. Gracias a la electrónica es asimismo posible vulcanizar cubiertas de neumáticos, productos de caucho moldeado, bandas de freno y muchos productos más.»

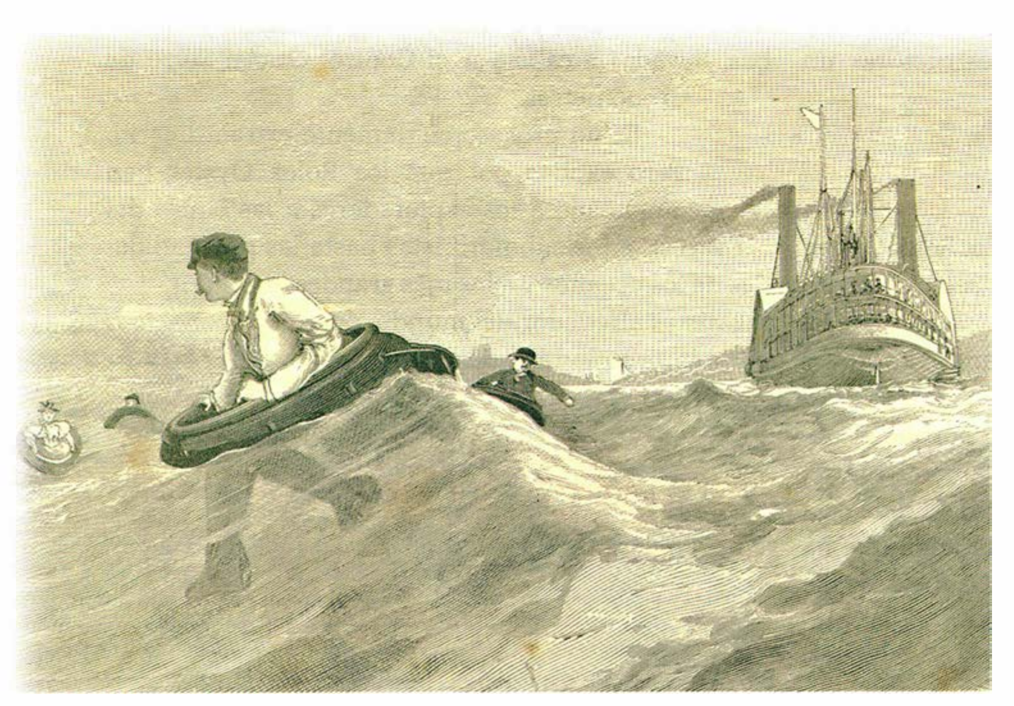
...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Con la ayuda de distintos remedios, los resfriados primaverales acostumbran durar una semana más o menos. En las primeras fases de un resfriado, especialmente si es de tipo nasal, es posible salir al paso del ataque irrigando la nariz, dos veces al día, con agua tibia en la que se haya introducido un poco de bórax. No hace falta jeringa; basta sumergir la nariz en una palangana de agua y, mediante intensas inspiraciones y espiraciones, conteniendo el aliento en la epiglotis, se irrigarán a fondo las vías nasales. Desde luego que la jeringa ofrece ventajas, especialmente desde el punto de vista de la limpieza.»

«El profesor James E. Keeler ha realizado el interesante descubrimiento de que el anillo de Saturno está compuesto de numerosos cuerpos pequeños y que los satélites del borde interno del anillo se mueven más rápidamente que los del borde externo.»

«El hábito de la cocaína es un añadido comparativamente nuevo a los males que acosan a la humanidad y augura sobrepasar incluso a la morfinomanía por la insidia de su crecimiento, por su explosiva destructividad y por el número de víctimas. Causas diferentes conducen a la adquisición del hábito. Entre ellas destaca la perniciosa práctica de algunos farmacéuticos (por suerte pocos) que ofrecen cocaína cuando se les solicita algo que alivie un dolor de muelas, una neuralgia y otros innúmeros achaques.»

«El bote neumático Layman está ganando una gran popularidad entre los aficionados a los deportes acuáticos, así como entre las señoras y los niños para su empleo en la playa. El fondo del bote, construido por completo de tela de caucho, lleva una robusta lámina de la misma tela de cuya parte delantera bajan dos botas o fundas para las piernas. La parte inferior de las botas lleva unas paletas plegables, que se abren en la carrera de retorno y se cierran en la de ida, al igual que las patas de un pato. El grabado ilustra una travesía por Hell Gate, East River, Nueva York, efectuado sin dificultades por un grupo en el que se contaba una dama valiéndose de tales botes. La experiencia queda descrita como deliciosa, con las estelas de los vapores aumentando las emociones.»



Travesía en grupo de Hell Gate con botes Layman

Reacciones químicas controladas por láser

Durante años, los químicos han perseguido con escaso éxito controlar las reacciones mediante láseres. Podrían lograrlo a partir de unos sutiles efectos cuánticos que produce la interacción entre la luz y la materia

Paul Brumer y Moshe Shapiro

Aunque la química ha hecho considerables progresos en los últimos cien años, los principios fundamentales de su práctica industrial siguen punto menos que invariantes. Los métodos empleados para romper o modificar los enlaces químicos aún dependen en muy gran medida de que se cambien la temperatura y la presión de la reacción o de que se añada un catalizador. Este proceder es a menudo ineficaz, porque no toma en consideración cuanto sabemos acerca de los movimientos moleculares. Por eso, las reacciones industriales suelen ser dispendiosas y generan, además de los materiales deseados, cantidades desorbitadas de productos secundarios inútiles.

Pero se han ideado nuevas técnicas, capaces de controlar las trayectorias seguidas por las reacciones. Se basan en la iluminación de los compuestos químicos con láseres. Estos métodos prometen la alteración, a voluntad, de los resultados de las reacciones a partir de cierta característica esencial de la mecánica cuántica: las propiedades ondulatorias de la luz y de la materia. Los últimos cálculos revelan la eficacia suma de los láseres a la hora de conducir la reacción por el camino deseado.

La idea de aplicar los láseres para guiar reacciones no constituye ninguna revolución. Los primeros intentos se remontan casi a la misma invención del láser, hace unos 35 años. Estos dispositivos emiten radiación de una frecuencia —un color— precisa, y pueden impartir una dosis definida de energía a un blanco dado. Se asociaba entonces los enlaces químicos a resortes de fuerza distinta, cada uno de los cuales vibraba cuando se les confería cierta cantidad de energía. Había la esperanza de que se pudiesen sintonizar los láseres y, así, atacar un enlace para debilitarlo o romperlo y con ello estimular que se formara un producto en vez de otro.

Pero este enfoque, denominado química selectiva de modo, conoció un éxito limitado. Lo cierto es que estaba condenado a fracasar con la gran mayoría de las moléculas porque presupone que los enlaces químicos son, en muy buena medida, independientes entre sí. Sólo unos pocos compuestos cumplen este requisito; por el contrario, casi todos los enlaces son interdependientes, y la energía discurre con facilidad de unos a otros. Por esa razón, la energía comunicada por el láser se distribuye por toda la molécula, de manera similar a lo que ocurre cuando se usan las fuentes tradicionales, mucho más baratas.

El método más reciente, el de control coherente, ha salido de las investigaciones que se emprendieron a mediados de los años ochenta, cuando se abordaron las propiedades de la luz lasérica que se habían ignorado en las primeras aproximaciones sobre el control químico. Una de ellas es la coherencia de la luz de láser. La "coherencia" guarda relación con la forma de emisión de luz por los átomos. En las fuentes de luz corrientes, en las bombillas domésticas, por ejemplo, la electricidad calienta el filamento y excita los átomos de tungsteno. Los átomos pierden esta energía soltando un poco de luz. Cada átomo, sin embargo, lo hace independientemente de los demás. La luz total que sale del filamento consiste, pues, en una maraña de ondas procedentes de átomos individuales. Diríase que la luz de las fuentes ordinarias semeja una columna de soldados que no guarden el paso. Los físicos dicen que esa luz es incoherente, o que no está en fase. Por contra, los átomos de los láseres actúan juntos. De ahí que todas las ondas que constituyen el haz de láser entero concuerden perfectamente y se comporten con la marcialidad unísona de un desfile.

La luz coherente muestra una propiedad importante: la interferencia constructiva y destructiva. No es necesario que la palabra "interferencia" signifique que unas ondas perturban las trayectorias de las otras; remite a la forma en que todas las ondas (incluidas las del agua) se combinan. En la interferencia constructiva, las crestas o los valles de dos (o más) ondas se juntan, y así alturas, o depresiones, se suman. La onda se hace entonces mayor y más honda (en otras palabras, la amplitud de la onda aumenta). En la interferencia destructiva, las crestas se juntan con los valles y la onda se extingue.

Interferencia de las ondas de luz

Los fenómenos de la interferencia constructiva y destructiva se manifiestan en cuanto se dispara un haz láser contra una placa opaca en la que se hayan abierto dos rendijas. Cada una hace las veces de una nueva fuente de ondas de luz. Las ondas que emanan de cada rendija, al expandirse, se interfieren entre sí. La interferencia se torna visible si colocamos una pantalla al otro lado de las rendijas. Aparecerá en ella un patrón de franjas, oscuras y lumino-

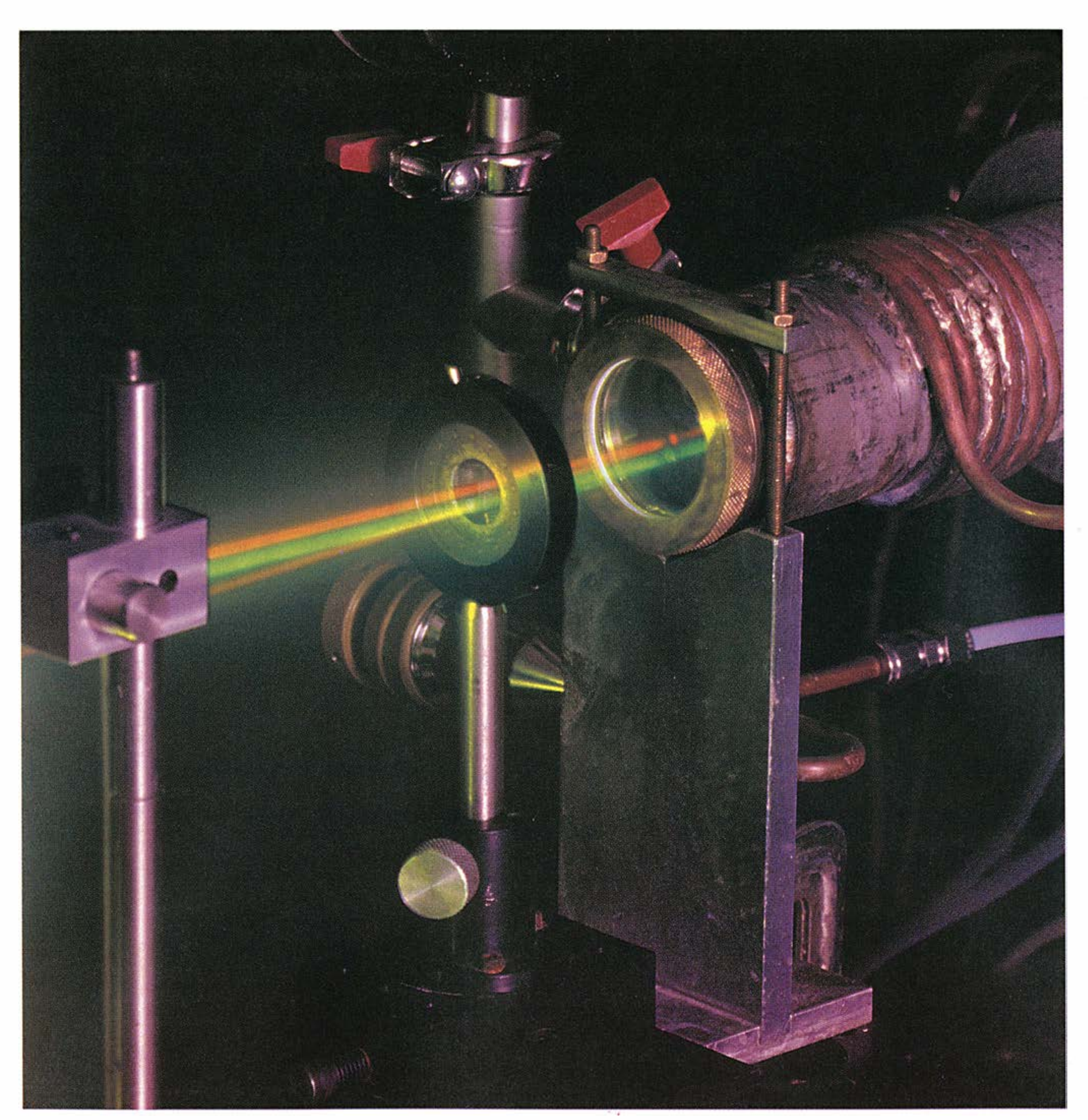
PAUL BRUMER y MOSHE SHAPIRO vienen colaborando desde que se conocieron en la Universidad de Harvard, hace más de veinte años. Brumer es profesor del grupo teórico de física química de la Universidad de Toronto. Shapiro ocupa la cátedra Jacques Mimran de física química teórica en el Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot.

sas. Las luminosas corresponden a la interferencia constructiva; las oscuras, a la destructiva.

La técnica de control molecular más reciente saca partido del hecho de que la luz no sea la única entidad que exhiba fenómenos de interferencia. De acuerdo con un principio básico de la mecánica cuántica, partículas, átomos y moléculas también se comportan como ondas que se interfieren entre sí. La observación experimental ha confirmado la existencia de esas ondas de materia y de las interferencias asociadas.

¿Cómo aprovechar los fenómenos de interferencia para controlar las reacciones? Se han desarrollado numerosas técnicas. La más sencilla consiste en dirigir dos haces de láser diferentes sobre las moléculas, cuyo aspecto ondulatorio excitará cada uno de ellos de manera particular. Las dos ondas de materia resultantes pueden interferirse entre sí. La interferencia constructiva, a su vez, puede originar un producto determinado. La destructiva haría que no se diera ese producto o que se incrementase la formación de otro. Resulta que podemos controlar el patrón de interferencia —es decir, la magnitud de los productos de reacción— por medio del ajuste de las propiedades de coherencia e intensidad de los dos haces.

Una explicación más específica incorpora una abstracción, la función de onda. Acuden a ésta los físicos para describir los sistemas atómicos



1. LOS HACES DE LASER que se disparan dentro de un recipiente lleno de átomos de sodio emparejados, o dímeros, pueden controlar la degradación de las moléculas. Los haces, cada uno de una frecuencia diferente (*uno sale verde, el otro rojo*), colocan las moléculas en estados cuánticos que se interfieren entre sí. Cada molécula se descompone en un átomo en su estado normal y otro en estado excitado. El estado que se forma viene determinado por el grado de interferencia.

y moleculares. Piénsese en una molécula formada por tres componentes conectados; llamémoslos *A*, *B* y *C*. Las partículas se portan como ondas; por tanto, cabe describir el estado inicial de la molécula mediante la función de onda, ente matemático que engloba toda la información disponible sobre el estado de la partícula y sus movimientos, o dinámica. El cuadrado de la función de onda, por ejemplo, da la probabilidad de hallar la molécula en una geometría concreta. Las funciones de onda son la herramienta descriptiva básica de la mecánica cuántica.

Imaginemos ahora que podemos descomponer la molécula *ABC* de dos formas distintas. O bien se rompe el enlace entre *A* y *B*, o bien el que une *B* y *C*. Por tanto, son posibles dos pares de componentes: *A* y *BC* o *AB* y *C*. La producción de cada una de estas posibilidades requiere que le aportemos energía a la molécula. Podemos irradiarla con un fotón de una frecuencia determinada (con lo que le impartimos una cantidad de energía conocida), que la molécula absorberá. Si el fotón posee energía suficiente, llevará la molécula *ABC* a su estado final, es decir, a un nivel de energía en el que *ABC* se descompone en dos productos. La función de onda que describe la molécula *ABC* en este estado incorpora dos tipos de información. Uno es la naturaleza ondulatoria de la luz de láser que incide en la molécula; otro, la naturaleza ondulatoria mecanocuántica de la molécula misma.

Pero, ¿qué ocurre si irradiamos la molécula a un tercio de la frecuencia (es decir, con luz que lleve sólo un tercio de energía)? En ese caso, la molécula tendría que absorber, para disociarse, tres fotones en vez de uno. La función de onda molecular en el punto de disociación sería entonces diferente, lo que reflejaría el hecho de que la molécula hubiese absorbido tres fotones en vez de sólo uno.

LUZ CORRIENTE

ATOMO

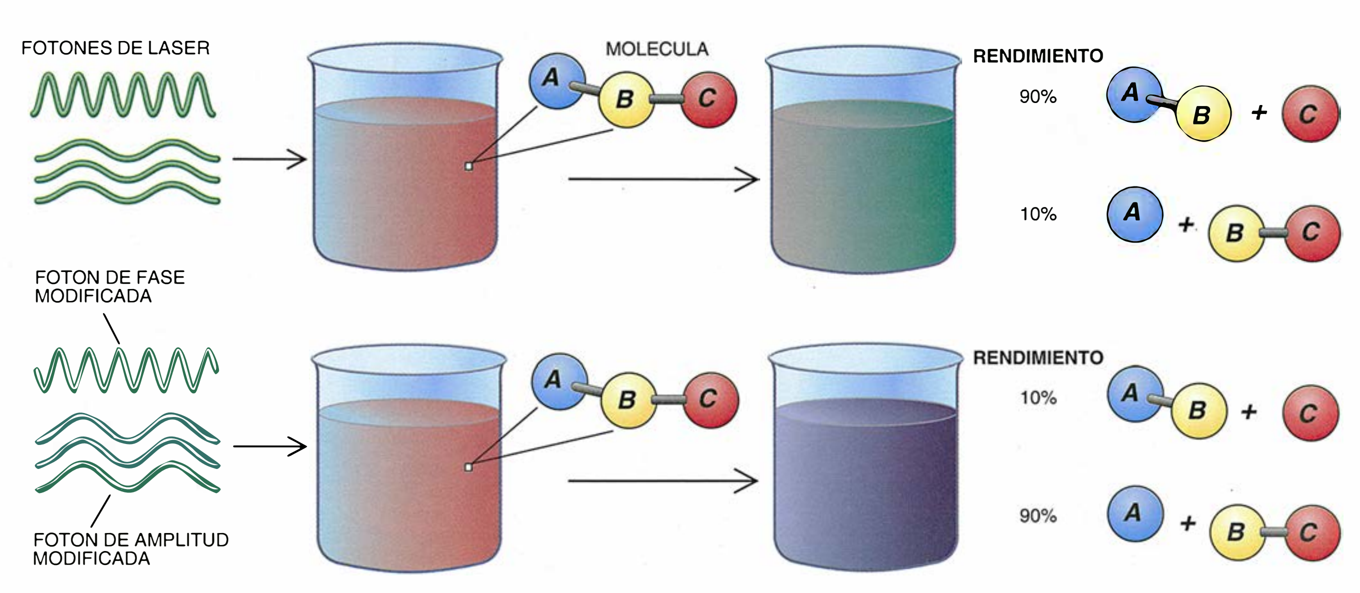
RESULTADO TOTAL

2. LA COHERENCIA DE FASE se refiere a la forma en que los átomos emiten energía radiante. En las las bombillas y otras fuentes comunes, los átomos excitados de forma espontánea emiten luz independientemente unos de otros. Por tanto, las ondas de luz de cada uno no se "alinean" y el resultado total a lo largo del tiempo está formado por emisiones aleatorias (*izquierda*). En la luz de láser (*derecha*), todos los átomos emiten en fase, por lo que el resultado es coherente.

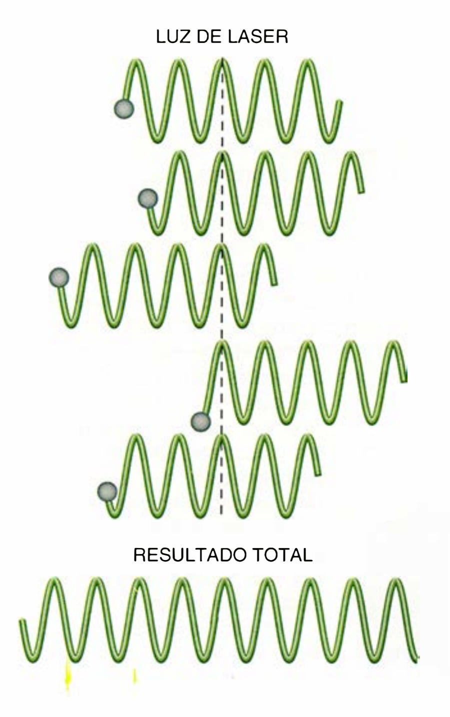
Podemos controlar el movimiento molecular si irradiamos simultáneamente *ABC* con dos campos de luz. De esa forma se producen, a la energía de disociación, dos funciones de onda distintas. Los dos modos de excitación se interfieren, tal y como hace la luz coherente al pasar por las dos rendijas. Quizá parezca raro que puedan interferirse dos trayectorias de reacción, pero semejantes interferencias son la esencia de la mecánica cuántica.

Por suerte para los químicos que andan tras el control molecular, el término matemático que describe la interferencia difiere de los dos resultados posibles de la reacción. Ajustando ese término de interferencia, podemos hacer que se creen sobre todo *A* y *BC* o sobre todo *AB* y *C*. La interferencia, y por tanto la cantidad de cada producto, depende de la amplitud y la fase relativas de los dos haces de láser originales, y así cabe alterarla ajustando estas características. Obsérvese que, como el control se basa en la interferencia, el método no requiere que se usen láseres intensos. En otras palabras, la luz débil puede tener un efecto sustancial en la dinámica de las moléculas.

Con Chi K. Chan estudiamos la disociación de la molécula diatómica de monobromuro de yodo (IBr). Esta



3. SE PRODUCE disociación química controlada si se irradia un compuesto a la vez con dos tipos de fotones de láser, uno de los cuales tenga mayor energía que el otro. Por ejemplo, la molécula *ABC* se disocia si absorbe un fotón de cierta energía o tres fotones, cada uno con un tercio de energía. Las funciones de onda asociadas con la excitación por cada tipo de fotón interfieren de forma mecanocuántica entre sí. La magnitud de la interferencia —y, por tanto, de lo producido en la reacción— se controla ajustando la amplitud (la altura de la onda) y la fase relativas de la luz láserica.



molécula puede dividirse en I + Br o en I + Br*, donde el asterisco indica que el átomo de bromo tiene un exceso de energía. Nuestros cálculos predicen que la variación de las intensidades y la fase relativa de dos haces de láser proporcionaría un enorme espacio de control de la reacción. Podríamos variar la cantidad producida de bromo de mayor energía de manera que constituyera entre el 25 y el 95 por ciento de todo el producto formado. Este grado de control es muy superior al soñado por la química industrial, que persigue una mejora de la selectividad de la reacción en un 10 por ciento. Los experimentos de Daniel S. Elliott han demostrado la validez de este método de controlar la ionización de los átomos. Robert J. Gordon ha obtenido también unos resultados magníficos al tratar de controlar moléculas diatómicas y poliatómicas.

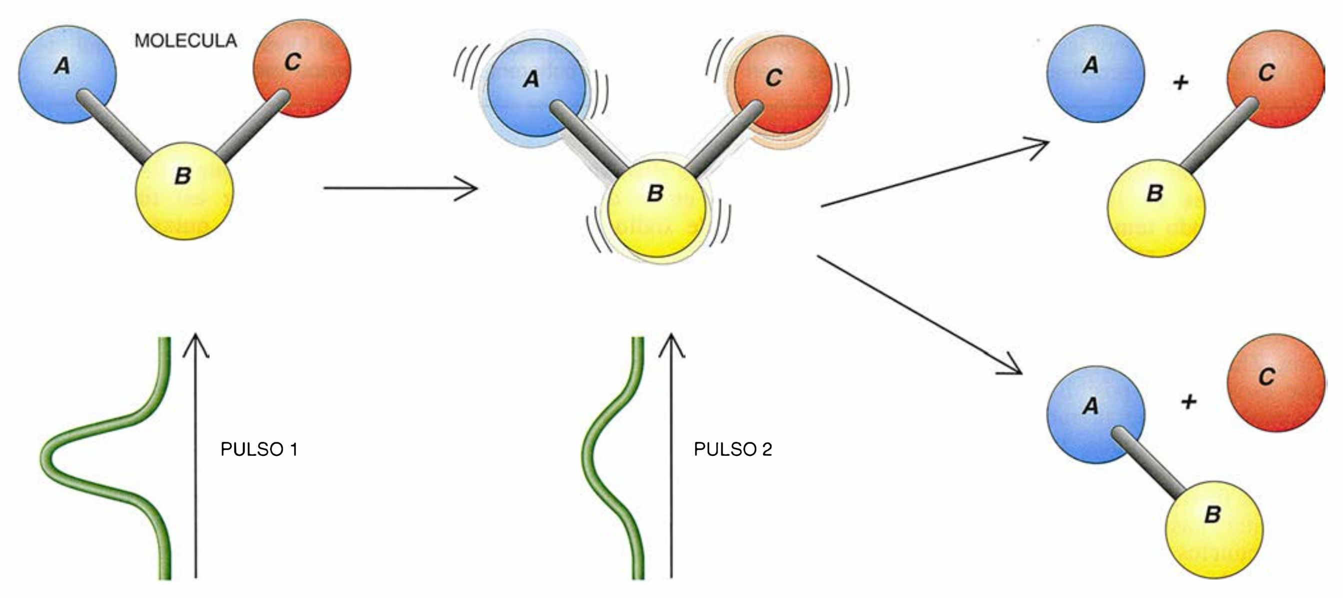
Esta forma de control coherente no se restringe al uso de un solo fotón o tres con un tercio de energía. La mecánica cuántica permite que se controle la probabilidad de que ocurra una reacción determinada, si las dos trayectorias corresponden a la absorción de un número par e impar de fotones, respectivamente. En este sentido, Andre Bandrauk ha mostrado, por vía numérica, que se produce un amplio control de la fotodisociación de una molécula de cloro en átomos con o sin incremento de energía, si la molécula absorbe dos fotones de un haz de láser y cuatro, cada uno con la mitad de energía, de un segundo haz. Nosotros hemos mostrado que el usar a la vez un fotón en conjunción con otros dos, cada uno con la mitad de energía, sirve para controlar la dirección que toman las moléculas cuando abandonan la región de reacción. Esta capacidad podría facilitar la separación de los productos, con lo que se fomentaría el rendimiento de la reacción.

Limitaciones actuales

Aunque los conceptos que se esconden tras el control de las reacciones con luz coherente valen para diversas moléculas aisladas, hay al menos dos obstáculos contra su aplicación inmediata. Uno es que el rendimiento del control por láser cae mucho cuando las fases de las ondas de luz o las funciones de onda moleculares están mal definidas. La fase pierde definición a causa de las colisiones entre las moléculas, que abundan más cuando la temperatura y la presión son altas, lo que suele ocurrir en los entornos industriales. Hay, pues, que utilizar estos métodos en entornos diseñados con habilidad o debe restringirse su empleo a una clase limitada de reacciones. La técnica actual funciona bien, por ejemplo, con gases diluidos, donde las moléculas están muy separadas unas de otras y, por tanto, chocan con menos frecuencia.

El segundo obstáculo de importancia, que ahora empieza a parecer superable, tiene que ver con la fase de la luz de láser. Ante dos fuentes de láser, no solemos saber hasta qué punto la luz de una está en fase con la luz de la otra. Además, cualquier inestabilidad del equipo afecta a la diferencia de fase. Una diferencia de fase inestable entre los dos láseres reduce el grado de interferencia y control.

Hay unas depuradas técnicas ópticas que, en potencia, tienen la capacidad de eliminar estos problemas relativos a la fase. Por ejemplo, los fotones se podrían generar haciendo que la luz pasase con una frecuencia por un material concreto de forma que se le indujera a emitir luz de una frecuencia distinta. Este proceso ofrecería dos campos de luz cuyas relaciones de fase estarían bien definidas. Podría-



4. LA ESTRATEGIA de los dos pulsos de láser puede también gobernar el resultado de una reacción química. El primer pulso coloca la molécula en un estado de superposición: hace que la molécula vibre y rote. El movimiento depende de las características de la molécula y del láser. El segundo pulso hace que la molécula se descomponga. Las diferencias en las cantidades producidas se controlan variando el tiempo que pasa entre los pulsos y cambiando sus frecuencias.

Interferencia y control coherente

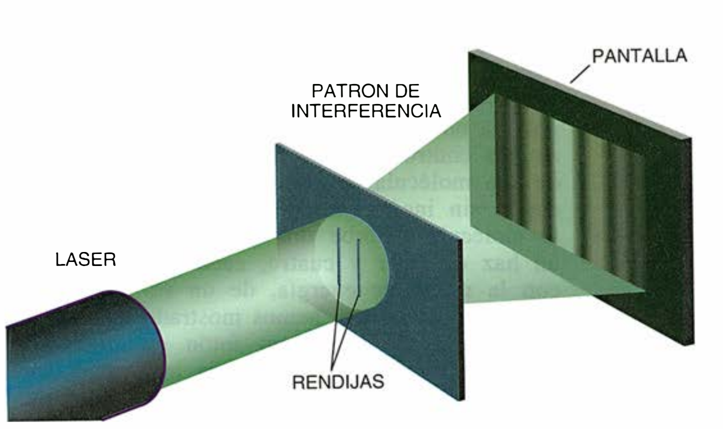
Quizás el aspecto más insólito de la mecánica cuántica sea el que, bajo determinadas circunstancias, la materia ofrezca el comportamiento propio de las ondas. Crea, por ejemplo, interferencias. Por ser esencial esta propiedad para que los láseres controlen las reacciones químicas, conviene decir algo sobre la matemática y los conceptos mecanocuánticos en que se basa el fenómeno.

La interferencia surge de la manera en que se suman las ondas. La regla para combinar muchas ondas dice que primero se sumen sus amplitudes (la altura de las ondas) y se eleve el resultado al cuadrado. Piénsese en la interferencia de dos ondas cuyas amplitudes en una posición e instante dados sean a y b. La intensidad de cada una será a^2 y b^2. La amplitud combinada, c, será la suma $\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$, y la intensidad combinada, $c^2 = (a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$.

La intensidad combinada no es la mera suma de las intensidades de cada onda (lo que daría $a^2 + b^2$), sino que interviene además un término de interferencia $2ab$ adicional. Si a y b son ambas positivas o ambas negativas, ese término de interferencia es positivo. La intensidad resultante, c^2, es, por tanto, mayor que la simple suma de las intensidades de cada onda. Hablamos entonces de interferencia constructiva. Si a es positiva y b negativa (o viceversa), el término de interferencia es negativo y la intensidad resultante menor que la simple suma de las intensidades individuales. Estamos ante una interferencia destructiva.

Las variaciones de la intensidad producidas por las ondas de luz que se interfieren se ven en el experimento de la doble rendija, en el que un haz de luz coherente atraviesa dos rendijas y da en una pantalla (*diagrama*). Las regiones brillantes que aparecen en ésta proceden de la interferencia constructiva entre los dos haces de luz que pasan por las rendijas; las oscuras son consecuencia de la interferencia destructiva. Las intensidades que caen entre estos dos extremos se deben a las combinaciones de máximos y mínimos que se producen sobre la pantalla.

Imaginemos ahora que la luz es reemplazada por electrones, átomos o moléculas. La intuición clásica dice que, en la pantalla, debería salir un patrón que tuviese el aspecto de dos manchones casi rectangulares, generados por el paso directo de las partículas a través de las rendijas. En realidad —y éste es el rasgo esencial de la mecánica cuántica— el patrón que se observa es claramente de interferencia. Es decir, el comportamiento de las partículas muestra características de ondas (en la medida en que las partículas mismas sean "coherentes", es decir, que estén preparadas de forma que tengan funciones de onda bien definidas). La teoría clásica de partículas no puede explicar esta observación.



SE FORMAN FRANJAS de interferencia cuando la luz coherente pasa por dos rendijas. Las moléculas también se interfieren así.

Por ello, la descripción adecuada de la dinámica de partículas en la mecánica cuántica implica el uso de una función de ondas que queda descrita por su amplitud y fase. En el experimento de la doble rendija, las funciones de onda cuántica que llegan a la pantalla a través de las rendijas se interfieren entre sí. Se produce la interferencia porque no sabemos por qué rendijas pasaron las partículas. Si tomamos cuenta de esa información, los patrones de interferencia desaparecen.

El experimento de la doble rendija engloba el principio cuántico fundamental según el cual cabe hacer que dos (o más) rutas que conserven la fase y que una molécula pueda tomar hacia un estado final determinado interfieran. En el caso del experimento de un fotón más tres fotones mencionado en el texto del artículo, no sabemos cuál de las dos rutas de excitación posibles conduce al estado final observado. Así pues, las dos rutas se interfieren. Esta interferencia inducida constituye el fundamento del control radiativo coherente de los procesos moleculares.

---

mos controlar aún más las diferencias de fase de las dos fuentes de luz retardando temporalmente uno de los haces con respecto al otro.

Una manera diferente de controlar los problemas con la fase se basa en el uso de haces de láser intensos. Con Zhidang Chen hemos mostrado que esos láseres posibilitan obviar la necesidad de que la radiación tenga fases bien definidas y controladas. Además, los métodos que recurren a campos fuertes tienen el potencial de aumentar bastante la cantidad total de productos de reacción y superar los efectos colisionales indeseados. Irit Sofer, Alexander Shnitman, Ilya Golub, Amnon Yogev y nosotros acabamos de aplicar experimentalmente en el Instituto Weizmann esta idea para controlar los diversos productos que se forman en la disociación de las moléculas de sodio emparejadas.

El uso de pulsos

Como la interferencia de las trayectorias moleculares es la clave del gobierno de las reacciones, cualquier estado de cosas, basado en el láser, que la induzca puede servir para el control de las reacciones. En vez de iluminar un blanco con dos haces constantes, cabría emplear pulsos cortísimos de luz lasérica. Los láseres modernos pueden generar pulsos de 10^{-14} segundos. Al contrario que la radiación de onda continua, un pulso de luz consta de un conjunto de frecuencias distintas y, por tanto, de un conjunto de fotones de diferentes energías. Una luz así tiene además una propiedad que quizá vaya contra la intuición. Cuanto más breve sea el pulso, más ancho resultará el abanico de energías que abarca.

Esta propiedad desempeña un papel importante en los métodos de control de los resultados de las reacciones químicas que se basan en los láseres de pulsos. Al entregarle un abanico de energías, un pulso puede inducir un movimiento (una vibración, una rotación) a una molécula, lo que a su vez afecta a su interacción con otros pulsos luminosos. De ordinario, una molécula como la *ABC* existe en un valor de la energía específico (es decir, cuantizado). Un sistema en una de esas energías fijas

reside en un estado estacionario y no se mueve con el tiempo. Para que una molécula experimente una dinámica ha de encontrarse en varios niveles de energía a la vez. A una reunión así de niveles de energía se le llama estado de superposición. La función de onda que lo describe es la suma de las funciones de onda que representan estados estacionarios de energías diferentes. Para construirlo, se dispara un pulso de luz de láser coherente contra la molécula. La manera en que se mueve entonces ésta depende de la naturaleza del pulso de luz y de su interacción con la molécula. Por tanto, podemos efectuar cambios dinámicos en la molécula alterando la contribución relativa de las frecuencias que componen el pulso, es decir, reconfigurando éste.

Entre los investigadores que han desarrollado estas ideas destacan Stuart A. Rice, David J. Tannor, Herschel Rabitz, Ronnie Kosloff y Kent R. Wilson. Sus resultados muestran que se requieren pulsos constituidos por una complicada mezcla de frecuencias para controlar la dinámica molecular de forma óptima, aunque a menudo basta con aproximaciones sencillas para descomponer las moléculas de manera controlada.

Si bien un pulso de luz puede alterar la dinámica de una molécula, por sí solo no provee un medio activo de controlar el resultado de una reacción química. Sin embargo, una idea que presentaron originalmente Rice y Tannor y que luego generalizamos nosotros en colaboración con Tamar Seideman permite el control con pulsos. En concreto, se necesita emplear una secuencia de dos pulsos. El primer pulso coloca la molécula en un estado de superposición que dicta la manera en que luego responderá la molécula al pulso siguiente. El segundo pulso rompe la molécula en diferentes productos.

Aunque no salte a la vista, este orden de cosas se parece al basado en los láseres de onda continua, en que el control se consigue gracias a la interferencia cuántica entre las funciones de onda moleculares. Pero esta interferencia se crea ahora por las diversas frecuencias incluidas en los dos pulsos de luz que inciden en la molécula. Con sólo variar el intervalo entre los dos pulsos y las frecuencias que constituyen el primero, modificaremos la interferencia y, por ende, la cantidad que se forme de cada producto. De ahí que, al contrario que en los experimentos con láseres de onda continua, donde se forma una corriente constante de productos, los láseres de pulsos nos dejen sacar partido del tiempo como variable experimental.

Y, en efecto, los estudios computacionales de Izman Levy y los nuestros propios revelan que el espacio de control es, potencialmente, muy extenso. En un análisis de la disociación de moléculas diatómicas mostramos que las cantidades resultantes podían variar de forma que el producto deseado fuera desde un 3 hasta un 95 por ciento de la cantidad total resultante, según la instalación de láser que se escogiese. En esencia, es posible anular un proceso o convertirlo en el único que se dé. El control de las moléculas poliatómicas, aunque no tan vasto, es, en todo caso, considerable. Hemos aplicado con éxito este método a la disociación del agua monodeuterada (HOD), hecha de hidrógeno, oxígeno y deuterio, para producir cantidades controlables de H + OD o D + OH.

En ayuda del sector farmacéutico

Quizá sean los laboratorios farmacéuticos quienes disfruten de una de las primeras aplicaciones en el mundo real del control por láser. Hoy en día, los químicos han de poner cuidado en que los productos de reacción adopten una conformación específica. A menudo, una misma molécula puede existir en dos formas distintas, a las que se da el nombre de enantiómeros. Como la mano derecha y la izquierda, los enantiómeros son imágenes especulares; suelen denominarse dextrógiros o levógiros. Los laboratorios farmacéuticos han de invertir bastantes esfuerzos en formar compuestos con la orientación correcta, pues a menudo un enantiómero es biológicamente activo y el otro es o inactivo o dañino.

El control por láser podría ser una solución del problema de la quiralidad. Hemos examinado la disociación de un compuesto que al degradarse puede dar tanto la forma diestra como la zurda; llamemos a esta sustancia *ABA'*, donde *A* y *A'* son enantiómeros. La reacción puede producir *A* y *BA'* o *A'* y *BA*. Como *ABA'* es muy simétrica, la disociación tradicional de *ABA'* mediante la absorción de luz no inclina la reacción en una dirección en concreto; el resultado es la producción de las mismas cantidades de *A* y *A'*. Pero nuestros estudios muestran que, bajo ciertas condiciones (en particular, en presencia de un campo magnético débil), se puede emplear el método de los dos pulsos para controlar las cantidades de los enantiómeros de suerte que se produzca *A* en vez de *A'*.

Los procedimientos basados en la interferencia cuántica no sólo sirven para controlar reacciones químicas. Cabe usarlos para desarrollar nuevas técnicas, y seleccionar el estado de energía de los productos de una reacción química. Y éstos, a su vez, podrían generar luz lasérica a frecuencias inaccesibles con los equipos actuales. Aún es más interesante la propuesta de Paul B. Corkum: usar los efectos de interferencia para construir láseres que emitan destellos de luz brevísimos, cuya escala temporal sea del orden de 10^{-16} segundos. Este intervalo viene a ser un décimo de la duración de los pulsos proporcionados por los mejores láseres actuales.

Con Gershon Kurizi hemos propuesto que se utilice la interferencia cuántica para regular el flujo de electrones en los superconductores. Se pueden diseñar dos caminos por los que un átomo donante pierda un electrón al recibir la luz, y provocar la interferencia de esos caminos. El control de esta interferencia significa que la dirección de los electrones arrancados —y, por tanto, de la corriente eléctrica— es regulable. El resultado sería un conmutador óptico rápido, quizá del orden de 10^{-12} segundos, muchas veces más veloz que los actuales. Han obtenido pruebas experimentales de ese control direccional Boris Zeldovich con detectores fotoeléctricos, Corkum con dispositivos semiconductores y Elliot con átomos ionizados por la luz.

La irrupción de la mecánica cuántica introdujo nuevos conceptos en el conocimiento de la naturaleza. Vamos dejando atrás el papel de observadores pasivos. Conforme nos acercamos al siglo XXI se va viendo que podemos extender las ideas mecanocuánticas y abrir posibilidades sin precedentes en la consecución de un mejor control de los procesos atómicos, moleculares y electrónicos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COHERENT LASER CONTROL OF BOUND-TO-BOUND TRANSITIONS OF HCL AND CO. S.-P. Lu, S. M. Park, Y. Xie y R. J. Gordon en *Journal of Chemical Physics*, vol. 96, n.º 9, págs. 6613-6620; 1 de mayo de 1992.

COHERENT AND INCOHERENT LASER CONTROL OF PHOTO CHEMICAL REACTIONS. M. Shapiro y P. Brumer en *International Reviews in Physical Chemistry*, vol. 13, n.º 2, págs. 187-229; septiembre de 1994.

COHERENCE CHEMISTRY: CONTROLLING CHEMICAL REACTIONS WITH LASERS. P. Brumer y M. Shapiro en *Accounts of Chemical Research*, vol. 22, n.º 12, páginas 407-413; diciembre de 1994.

Hermann Helmholtz

Médico de formación, realizó descubrimientos fundamentales no sólo en el campo de la fisiología, sino también en física. En cuanto filósofo, reflexionó sobre las consecuencias gnoseológicas de la ciencia

Wolfgang U. Eckart y Christoph Gradmann

Hermann Helmholtz nació el 31 de agosto de 1821 en Potsdam, donde su padre, Ferdinand, era profesor de instituto. En 1838 ingresó en el Instituto Médico-Quirúrgico Friedrich-Wilhelm de Berlín, "La Pepinière". ¿Por qué estudió medicina y por qué en este centro? Con 17 años, estaba ya, por influencia paterna, familiarizado con los problemas de la filosofía. Sus cualidades y aficiones le inclinaban hacia las ciencias naturales y en particular hacia la física. No parecía mostrar especial interés por la medicina.

Por otra parte, la formación en La Pepinière, que servía al estado prusiano como centro para la preparación de médicos militares, difería bastante de la ofrecida en la universidad. Durante los cuatro años que solía durar la estancia en el centro, los alumnos estaban sometidos a un rígido reglamento y se comprometían a ejercer como médicos militares un tiempo doble a la duración de los estudios. En compensación, los estudiantes, en su mayoría de familias pobres, recibían becas.

La verdad es que los ingresos del padre no constituían impedimento para ingresar en la universidad. La opción tuvo que ver menos con el coste que con las inciertas perspectivas que se le ofrecían a un físico recién licenciado. Se suponía que la física no daba para comer; en cambio, a mediados del siglo XIX los estudios de medicina ya se orientaban al ejercicio de una profesión estable y, además —como consecuencia de las reformas de la enseñanza superior en Prusia—, suministraban una amplia formación científica.

Sea como fuere, en el siglo XVIII ya habían quedado sentados algunos de los fundamentos de la patología y de los métodos de diagnóstico modernos, y se habían elaborado nuevos procedimientos terapéuticos: la vacunación antivariólica y la terapia digitálica, por ejemplo. En el tránsito del siglo XVIII al XIX, se había avanzado bastante en el conocimiento de la anatomía humana, y, ya en época de Helmholtz, se estaba configurando la medicina científica.

En La Pepinière, el plan de estudios era duro y rígido. En mayo de 1839, seis meses antes del *tentamen philosophicum*, una suerte de examen intermedio, Helmholtz escribía a sus padres sobre sus obligaciones y les hablaba de no menos de doce asignaturas con un total de 42 horas semanales de clase. La rigidez, por fortuna, se limitaba a los aspectos formales. La enseñanza no se atrincheraba en la tradición; muy al contrario, el nivel era alto. En los años treinta y cuarenta los alumnos asistían incluso a las actividades docentes de la Universidad de Berlín. Además, la formación era plural: junto a las asignaturas médicas, se enseñaba también botánica, química, física, idiomas e historia.

Pero la docencia solía ceñirse a los aspectos teóricos. Rara vez se incluían experimentos en las clases. Las visitas científicas también eran excepcionales. En fisiología no se hacían prácticas de laboratorio. Tan sólo se realizaban ejercicios anatómicos de muy dudosa eficacia. Helmholtz completaba los cursos oficiales con clases particulares. Leía sobre bellas artes y filosofía —Immanuel Kant y Friedrich Wilhelm Joseph von Schelling—, así como obras de matemática y física. Entre sus maestros sólo encontró dos particularmente estimulantes: el anatomista Johann Lukas Schönlein y el fisiólogo Johannes Müller, a cuyas clases de anatomía patológica general y comparada y de fisiología asistió. Tuvo en Müller, director de su tesis doctoral, el estímulo decisivo para dedicarse a la fisiología científica.

El 2 de noviembre de 1842 Helmholtz recibió el grado de doctor con un trabajo sobre anatomía patológica. Completó sus estudios trabajando un año como médico adjunto en la Charité, hospital militar fundado en 1710 del que surgieron las clínicas universitarias de Berlín. Acabada la carrera, tenía que ejercer de médico militar, con el riesgo de cortar los lazos con la vida académica berlinesa. Pero se le asignó un destino atractivo: cirujano de escuadrón y médico castrense en Potsdam. Lo que comportaba una cuádruple ventaja; a saber: la plaza militar ofrecía cierto nivel cultural, le era perfectamente conocida por tratarse de su ciudad natal, Berlín no estaba lejos y, sobre todo, el servicio en tiempo de paz no resultaba oneroso.

Helmholtz disponía de mucho tiempo para atender a sus intereses científicos. Se montó un laboratorio y empezó a ocuparse de los aspectos térmicos de los procesos fisiológicos. En 1845 publicó *Sobre el gasto metabólico de la actividad muscular*, trabajo experimental donde critica la idea de una fuerza vital autónoma, defendida todavía por Müller, y muestra que está en contradicción con la comprobada producción de calor corporal por el metabolismo y el movimiento muscular.

Para hacer carrera académica necesitaba mantener contactos con la vida universitaria, sobre todo con jóvenes colegas que sintonizaran con él. Una ocasión propicia para ello se le presentó durante los cinco meses que, desde octubre de 1845, pasó en Berlín para preparar su examen de estado. Probablemente por mediación de Müller, entró en el laboratorio privado de Heinrich Gustav Magnus, profesor de física. Desde hacía algunos años este laboratorio, magníficamente dotado, constituía el punto de

WOLFGANG U. ECKART y CHRISTOF GRANDMANN colaboran en el seminario de historia de la medicina de la Universidad de Heidelberg.



1. RETRATO DE HERMANN HELMHOLTZ (1821-1894) a la edad de 26 años. Formado en el Instituto Médico-Quirúrgico Friedrich-Wilhelm de Berlín, "La Pepinière", había alcanzado ya renombre con un ensayo *Sobre la conservación de la fuerza*, donde formulaba el principio de conservación de la energía basándose en consideraciones fisiológicas.

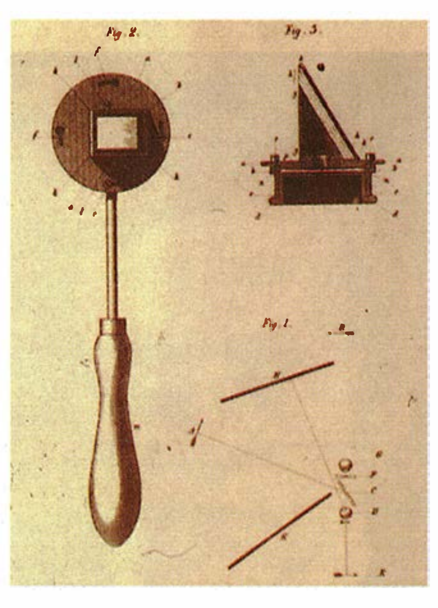
encuentro de un grupo de entusiastas de la física aplicada. Sus miembros eran sobre todo jóvenes: médicos como Ernst Wilhelm Brücke y Emil Du Bois-Reymond, militares con formación técnica como Werner Siemens y técnicos civiles como el mecánico Johann Georg Halske. Siemens y Halske crearon en 1847 la primera empresa de la industria eléctrica alemana.

En el año 1845 se fundó la "Sociedad de Física", que emprendió la publicación de una revista con el programático título de "Avances de la Física". Se proponían presentar ésta como disciplina matriz de unas ciencias naturales orientadas a la investigación experimental. La fisiología se encontraba entre ellas: se le otorgaba el rango de disciplina experimental y rama de la física.

Helmholtz no sólo superó el duro examen, sino que en Berlín trabó importantes relaciones personales y científicas. En particular hizo amistad con Du Bois-Reymond, dos años mayor que él y quien lo tomó bajo sus alas. Mantuvo contactos regulares con la vida académica berlinesa y se convirtió en nuevo miembro de un grupo de fisiólogos experimentales jóvenes, el "trust de la física orgánica". Du Bois se expresaba con entusiasmo sobre su nueva amistad en una carta dirigida al fisiólogo Carl Ludwig: "He trabado conocimiento con Helmholtz, lo que me ha llenado de gran satisfacción. Junto a Brücke y (*sauf la modestie*) yo mismo, es el tercer físico orgánico del grupo. Ha devorado química, física, matemáticas, tiene su propia visión del mundo y es rico en ideas y nuevas interpretaciones."

El legado permanente que ha dejado aquel grupo, también llamado el de "los físicos orgánicos de 1847", es la explicación consecuente de todos los procesos vitales, en particular los de la fisiología de los sentidos, como fenómenos fisicoquímicos cuantificables. El famoso reto de Du Bois, que "algún día la fisiología... se integre por completo en la gran unidad de las ciencias naturales teóricas", expresa el objetivo de reformular la fisiología basándose en la física contemporánea. Sobre todo por las consecuencias que habría de tener, es característica además la actitud antivitalista (es decir, contra la idea de una fuerza vital autónoma), polémica que en ocasiones adquiere tintes violentos.

De regreso a Potsdam, Helmholtz comenzó a trabajar en su estudio *Sobre la conservación de la fuerza*. En diciembre de 1846 escribía a Du Bois-Reymond: "En el próximo trimestre estoy de guardia en el hospital militar, allí me dedicaré fundamentalmente a la naturaleza constante de las fuerzas". A mediados de febrero de 1847 ya había un borrador, que discutió con Du Bois, y en julio presentaba el ensayo en la Sociedad de Física. Se publicaría en ese mismo año.



2. CON EL OFTALMOSCOPIO de Helmholtz se vio de forma sencilla el fondo del ojo. Se abrió así un nuevo campo en el diagnóstico oftalmológico.

Tenía clara conciencia de la importancia de este texto para su futuro profesional. El 8 de septiembre de 1847 le comunicaba a Olga von Velten, su prometida, refiriéndose a un pequeño trabajo experimental que formaba parte del trabajo global, que "había matado algunas ranas y... empezado a redactar el trabajo que trata de ello para así inundar todo el mercado literario con mis producciones".

Escrito con pretensión filosófica, *Sobre la conservación de la fuerza* representa una rara excepción entre los trabajos científicos de sus colegas y, utilizando un concepto de Thomas S. Kuhn, marca un cambio de paradigma, es decir, un giro en el método científico-natural y en la construcción de modelos. Cuando se estudian los aspectos cuantitativos del intercambio energético —en el caso de la fisiología experimental el intercambio térmico del organismo—, es necesario enfrentarse con la ley natural de la conservación de la energía; el postulado correspondiente fue formulado casi simultáneamente por varios investigadores, si bien no distinguían todavía entre fuerza y energía.

Pronto se le presentó a Helmholtz una oportunidad para aprovechar su creciente reputación. Cuando en 1848 se concedió a Brücke la plaza de profesor de fisiología y patología general en Königsberg, Helmholtz le sustituyó en la clase de anatomía de la Escuela de Arte de la Academia de Berlín y ocupó también su cargo de asistente en el Museo Anatómico de Müller. El 30 de septiembre de 1848 se le liberó de los tres últimos años de servicio castrense, y, con ello, de la práctica médica. Podía ahora dedicarse por entero a la ciencia.

No estaba contento con su situación en Berlín. Por una parte, los 600 táleros que recibía por su doble ocupación no eran suficientes para casarse; por otra, su posición en la Academia de Arte no correspondía a sus intereses ni a su ambición profesional. A finales de 1848 Brücke fue llamado de Königsberg a la Universidad de Viena. De nuevo se presentaba la posibilidad de sucederle. En principio, lo único claro era que la elección debía recaer en uno de los tres "físicos orgánicos" que no habían alcanzado cátedra alguna. Brücke pensaba para su sucesión primero en Du Bois y sólo en segundo lugar en Ludwig y Helmholtz. La Facultad de Medicina de Königsberg nombró a Du Bois-Reymond, dejando en segundo y tercer lugar a Helmholtz y a Ludwig. Pero Du Bois mostraba poco interés, y Ludwig, que hubiera aceptado muy a gusto, no tenía de entrada, a pesar de que por edad y por calificación era un buen candidato, ninguna posibilidad. Las razones eran de índole política; había tomado parte activa en la revolución de 1848, y en consecuencia no era bien visto por el Ministerio de Cultura prusiano. Por otro lado, Helmholtz, que hacía poco se había visto libre de sus obligaciones militares, no podía permitirse el lujo de renunciar a un nombramiento del ministerio en Königsberg. Johannes Schulze, que redactó el decreto, certificó expresamente el "comportamiento decente" de Helmholtz y "una personalidad que despierta toda confianza", en contraste con el desacreditado Ludwig.

Helmholtz hubo de agradecer el dictamen por el que se le nombró para Königsberg el 19 de mayo a su carácter apolítico. Algunos autores atribuyen a Helmholtz convicciones liberales, pasando así por alto que sus progresos se debían sólo a su trabajo científico. Según toda la información de que disponemos, no manifestó interés alguno por la revolución de 1848, que fue motivo de acaloradas disputas entre Ludwig y Du Bois. Con toda razón, Richard Kremer insiste en que, dejando aparte un prusianismo vagamente entendido, carecía de credo político. Sin

duda, fue este aspecto de su personalidad, junto a sus indudables dotes, lo que le aseguró las simpatías del gobierno del estado prusiano bajo Federico Guillermo IV.

Adquirido ya renombre en la comunidad científica merced a su trabajo teórico sobre la "conservación de la fuerza", se aplicó, recién nombrado profesor en Königsberg, a la fisiología de los sentidos. Se concentró en el ojo y en el oído. Entre otros frutos, rindió un notable *Tratado de óptica fisiológica*, publicado en tres tomos entre 1856 y 1867.

En 1851, basándose en la descripción anatómica de Brücke sobre el globo ocular, desarrolló el oftalmoscopio, aparato que permitía observar el fondo del ojo. Vemos ahí un logro típico de los "físicos orgánicos": la explicación de los fenómenos fisiológicos a través de leyes fisicoquímicas les impulsaba a construir aparatos que demostrasen y midieran tales fenómenos. El oftalmoscopio se utilizó originalmente para ilustrar la anatomía del ojo y la trayectoria de la luz; pero a la vez podían así los "físicos orgánicos" exhibir su competencia como científicos experimentales.

Tal vez la contribución más original de Helmholtz durante su período de Königsberg fue la medición de la velocidad de transmisión del estímulo nervioso. Mediante la comparación de los tiempos de respuesta al estímulo nervioso de los músculos próximos y lejanos de las ranas, llegó en 1850 a la conclusión de que la corriente nerviosa se propagaba a la velocidad de 25 metros por segundo, valor bajísimo para sus contemporáneos. Para esta investigación construyó él mismo dos aparatos; uno, para registrar gráficamente la contracción muscular, el kimiógrafo (en griego registrador de ondas) y, otro, denominado posteriormente péndulo de Helmholtz, que servía como reloj para la medición de las más pequeñas unidades de tiempo.

A finales de 1851 su plaza de profesor titular de Königsberg se convirtió en cátedra, lo que comportó una mejora de sueldo. Con todo, Helmholtz abandonó la ciudad. No fue la menor de las razones la tuberculosis de su mujer, cuya salud se resintió por el crudo clima de la Prusia oriental. Con la ayuda de Alexander von Humboldt (1769-1859), en 1855 se trasladó a la Universidad de Bonn, donde ocupó la cátedra de fisiología y anatomía.

Una elección desacertada. La Facultad de Medicina, conservadora desde el punto de vista científico, le puso las cosas difíciles. A su pesar, Helmholtz tuvo que dar clases de anatomía, materia en la que estaba menos cualificado.

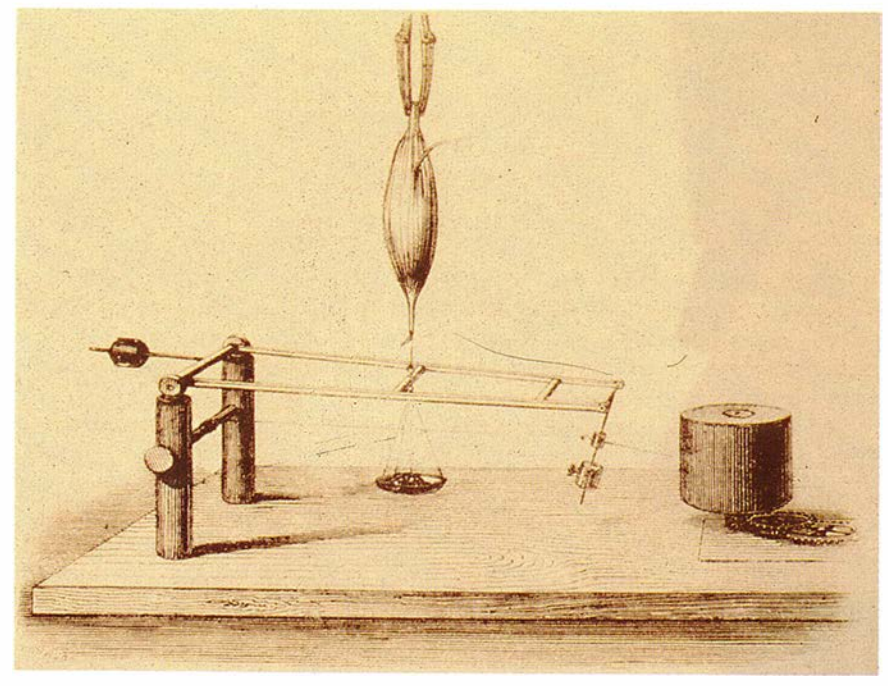
En esta situación, el gobierno de Baden ofreció en mayo de 1857 al ya famoso investigador una cátedra de fisiología y un nuevo instituto. Con anterioridad, el químico de Heidelberg Robert Bunsen había recomendado a la administración de Karlsruhe que nombrara a un fisiólogo de orientación física, línea de investigación sólo seguida por Du Bois-Reymond, Helmholtz, Brücke y Ludwig. "De los nombrados no hay duda alguna de que" debía "considerarse a Helmholtz el más genial, el más capacitado y el de formación más amplia".

Al principio, Helmholtz rechazó el nombramiento porque en Bonn se le había prometido la construcción de un nuevo instituto anatómico. Además, el Ministerio de Cultura de Prusia le había concedido un aumento de haberes de 1200 a 1600 táleros. Sin embargo, la construcción del nuevo instituto sólo se financiaría, "posiblemente", con la "venta de varios solares, si bien de poco valor", por lo que resultaba más que problemática. En tales condiciones, "esperar confiadamente y al mismo tiempo estar agradecido por los múltiples testimonios de indudable reconocimiento" eran actitudes que no se correspondían con su impaciencia, según comunicó el ministro Karl Otto von Raumer al káiser, el 8 de mayo de 1858.

Entre tanto, Helmholtz había aceptado un nuevo nombramiento en Heidelberg. Allí no sólo encontró más "tentadoras" las tareas docentes e investigadoras, limitadas a la fisiología, sino también el sueldo. El gobierno de Baden estaba dispuesto a sufragar, además de un nuevo instituto, un sueldo de 3600 táleros. Una oferta espectacular para los usos de la Universidad de Heidelberg, donde el estipendio anual de un catedrático de filosofía estaba en torno a los 1500 táleros.

Este nombramiento estaba en consonancia con la política científica llevada a cabo en el Gran Ducado de Baden. Desde 1850, el gobierno había dedicado casi todos los recursos de la universidad a la construcción y dotación de infraestructuras para las disciplinas científicas. Los encargados del programa de promoción específica de estas ramas del saber fueron Bunsen, Kirchoff y, más adelante, Helmholtz.

Sobre el fondo de la revolución de 1848, el estímulo estatal a la investigación debía conseguir una mejoría de las condiciones de vida de la población, para evitar nuevos movimientos de agitación social. Pero en el industrializado Baden esto significaba aumentar la producción agrícola —en el sentido del químico y reformador Justus Liebig— mediante una optimización de la formación científica. Al servicio de ello estaba la Facultad de Ciencias Naturales de



3. EL KIMIOGRAFO (en griego, registrador de ondas) sirvió como miógrafo (registrador de movimientos musculares) para representar las contracciones de los músculos. Helmholtz utilizó una modificación de este aparato para medir la velocidad de transmisión del impulso nervioso.

Heidelberg, cuya reestructuración había planeado Bunsen, director del Instituto de Química.

En el semestre de invierno de 1858 se trasladaron allí Helmholtz y su familia. Su primera carta a Du Bois-Reymond desde Heidelberg, fechada el 29 de octubre de 1858, trasluce el temor a una excesiva carga docente: "Hasta ahora todo va bien. He andado muy ajetreado con la instalación provisional del laboratorio, y seguiré así durante el invierno, ya que hay demasiados estudiantes que han de realizar el curso práctico para poderse examinar, y hasta ahora no han tenido oportunidad. Me temo que la norma que obliga a los estudiantes de Baden a seguir un curso práctico de fisiología es una exageración de los principios ilustrados y puede llegar a suponer para mí una pesada carga."

Los trece años que pasó en Heidelberg fueron de los más productivos de su vida. También los más agitados. En diciembre de 1859 murió su primera mujer, dejándole dos niños de corta edad. En 1861 se volvería a casar con Anna von Mohl, hija de un profesor. Presenció y comentó con Du Bois-Reymond la guerra prusiano-austríaca contra Dinamarca (1864), la guerra entre Prusia y Austria (1866) y la guerra franco-prusiana de 1870/71; en ésta participó al frente de un hospital militar en Heidelberg y como médico de campaña en la batalla de Wörth. A esos años corresponden importantes investigaciones en fisiología óptica y acústica, en hidrodinámica y electrodinámica, y en fundamentos de geometría.

Por lo que concierne al primer campo, terminó la tercera parte del *Tratado de óptica fisiológica*, que aborda la percepción de la profundidad y del tamaño, así como las ilusiones ópticas. Los trabajos previos habían suscitado ya difíciles problemas en el terreno epistemológico. La comprensión de que los fenómenos fisiológicos no pueden explicarse siempre por un proceso causal, sino que a veces requieren justificaciones psicológicas, debió de dejar perplejo a Helmholtz, fanático de la causalidad.

En su lección magistral de 1862, "Las ciencias naturales en el conjunto de las ciencias", insistió en las estrechas conexiones que hay entre física, fisiología, psicología e incluso estética: "La fisiología de los órganos de los sentidos está en estrecha relación con la psicología, ya que comprueba en las percepciones sensoriales los resultados de procesos psíquicos que no se sitúan en el campo de la conciencia autorreflexiva y que en consecuencia han de permanecer ocultos a la introspección psicológica."

En carta a Emil Du Bois-Reymond del 3 de enero de 1865 Helmholtz menciona sus dificultades para confeccionar la tercera parte de la *Optica fisiológica*: "Es un capítulo funesto porque forzosamente ha de penetrar mucho en lo psicológico y no se puede convencer a la gente con pensamientos, por muy meditados que sean." Lo que pone de manifiesto en qué medida las consideraciones epistemológicas acompañaban a las investigaciones fisiológicas de Helmholtz a principios de los años sesenta. Cuando se recapitulan las expresiones de este tenor que irán apareciendo hasta los años noventa, se nos revela un empirista marcado por el sensualismo y el simbolismo teórico. En una conferencia de 1891 afirmó que el punto de partida de todo conocimiento es "el impulso a dominar la realidad mediante el concepto, o bien —lo que en mi opinión es decir lo mismo con otras palabras— a descubrir la vinculación causal de los fenómenos".

Con anterioridad, en la lección magistral mencionada, había especulado sobre el proceso de la formación de los conceptos, que explica así: ocurre cuando "conectamos con el pensamiento los hechos que nos muestra la experiencia y creamos conceptos, sean conceptos clasificatorios o sean leyes". Por tanto, "el conocimiento adquirido no sólo adopta una forma que permite tratarlo y conservarlo con mayor facilidad", sino que se amplía, ya que "las reglas y leyes encontradas se aplican también a cualquier caso similar que se presente en el futuro". Para Helmholtz la formación científica parte de las "sensaciones sensoriales", que se dirigen en forma de impulso nervioso al cerebro, donde son finalmente "percibidas" e interpretadas como "noticia para la conciencia".

Las sensaciones de los órganos de los sentidos sirven de base a estas noticias en cuanto "signos de las cualidades del mundo exterior, cuya interpretación hay que aprender mediante la experiencia". Insiste sobre ello, entre otros lugares, en su trabajo epistemológico de 1878 *Sobre las realidades de la percepción*. A este proceso sensorial que precede al conocimiento se asocia el trabajo mental integrador, a la manera de una reconstrucción de la realidad a partir de sus signos.

Dio un enorme impulso a la fisiología de la audición. A finales del verano de 1862 apareció *La percepción de los tonos musicales como base fisiológica para la teoría de la música*. Recoge allí sus investigaciones en fisiología neurológica y acústica realizadas desde 1850, cuando en Königsberg estudia la velocidad de propagación del estímulo nervioso. Parecía confirmarse la hipótesis de Du Bois-Reymond sobre la transmisión molecular de los impulsos eléctricos nerviosos, obteniéndose una definitiva victoria del mecanicismo sobre el vitalismo.

A continuación, se ocupaba de la acústica, de la demostración matemática de que "la parte musical del sonido" tenía su origen en "la existencia de los armónicos superiores", que serían perceptibles sensorialmente. Contradecía así la ley acústica del físico Georg Simon Ohm, hasta entonces aceptada, según la cual el sentido del oído sólo es capaz de captar oscilaciones armónicas simples.

Helmholtz exploraba los propios cuerpos de resonancia de la percepción acústica y desarrollaba una teoría de la audición basada en la resonancia que, casi sin cambios, se mantuvo vigente hasta el cambio de siglo. De nuevo, pues, confluyen hallazgos y conocimientos multidisciplinares: fisiología de la conducción eléctrica del impulso nervioso y teoría ondulatoria de la física de la resonancia, interpretación de la anatomía del oído interno de acuerdo con la resonancia física y lucubraciones sobre aspectos estéticos.

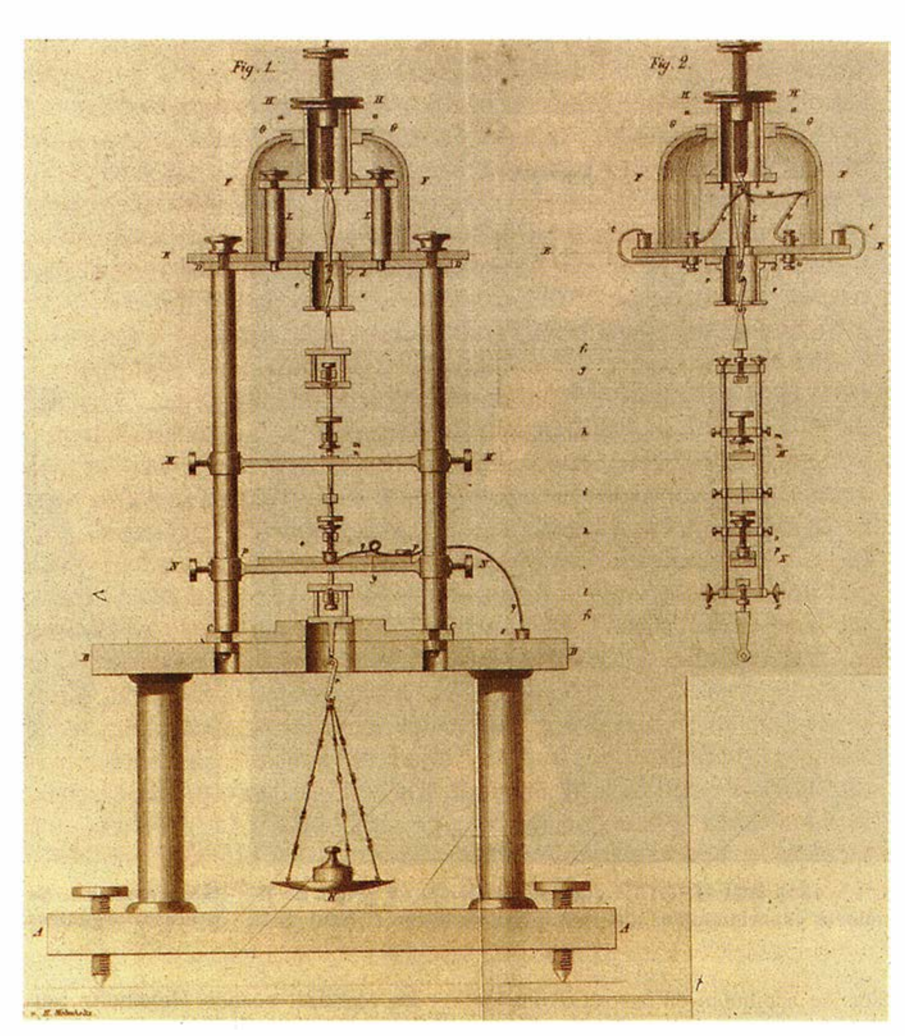
Durante su estancia en Heidelberg se dedicó a la hidrodinámica y electrodinámica. Partía de su trabajo, publicado en 1858, *Sobre las integrales de las ecuaciones hidrodinámicas correspondientes a movimientos turbulentos*. Estaba particularmente interesado en los fenómenos de rozamiento en los fluidos. Trató también repetidas veces de este tema en diversas comunicaciones a la Asociación Científico-Médica.

El 3 de marzo de 1859 presentó ante la misma los resultados de sus mediciones de los rozamientos de distintos fluidos. Había realizado el trabajo experimental con Gustav von Piotrowski. En el informe del 8 de mayo de 1868, *Sobre los movimientos discontinuos de los fluidos*, se señala que, también en este campo, la insatisfacción por la "muy imperfecta aproximación" del investigador "a la realidad" suponía un estímulo para la reflexión gnoseológica. Helmholtz quedó sorprendido por el hecho de que, dadas determinadas premisas, de sus ecuaciones hidrodinámicas se deducía "la misma ecuación diferencial parcial que la que se da para las corrientes estacionarias de electrici-

dad o de calor en conductores cuya conductividad es uniforme". Aunque "en muchos casos se aprecian grandes diferencias" respecto a las corrientes de los fluidos que se descomponen en gotas.

En la tercera comunicación sobre hidrodinámica, el 30 de octubre de 1868, informó de dos teorías sobre las "corrientes [estacionarias] en los fluidos con rozamiento", basadas en los experimentos que había realizado Alexis Schklarewsky en su laboratorio. Si se introducía una pequeña esfera de peso específico sólo ligeramente superior al del agua en un tubo lleno de agua, caía siempre por el centro del tubo sin tocar las paredes. Ante esa observación, asoció las fórmulas y demostraciones matemáticas que explican este fenómeno con su principio "sobre la conservación de la fuerza" de 1847 y lo integró en la hidrodinámica.

Para entonces, había abandonado sus investigaciones fisiológicas y los problemas epistemológicos asociados. El 28 de marzo de 1869 escribía a Carl Ludwig: "De momento, estimulado por las investigaciones y problemas fisiológicos, he vuelto a los estudios eléctricos sobre la evolución temporal y la extensión de las descargas. He dejado intencionadamente de lado la óptica y la psicología fisiológica. Creo que a la larga filosofar mucho lleva a cierta desmoralización y provoca que los pensamientos se tornen débiles y vagos. Quiero volver a disciplinarlos con la experimentación y las matemáticas para, más tarde, volver a la teoría de la percepción. Conviene, además, oír lo que dicen otros al respecto, sus objeciones, sus interpretaciones erróneas, etc., y comprobar si les interesan estos temas."



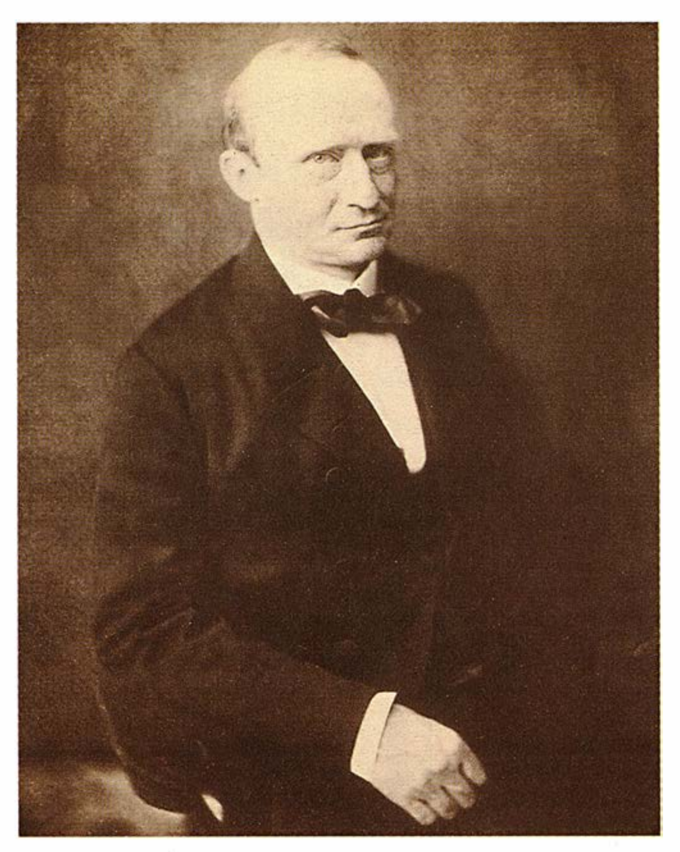
4. EL DIBUJO MUESTRA EL APARATO que diseñó Helmholtz para medir la velocidad de transmisión del impulso nervioso. A la izquierda se muestra el aparato completo, a la derecha se ve cómo el nervio (*w*) se coloca de suerte tal que pueda estimularse en diversos puntos.

Tras su opúsculo sobre la *Distribución eléctrica* (1861), causó sorpresa y admiración en el campo de la electrofísica la publicación de la primera parte de su *Teoría de la electrodinámica* (disertación del 21 de enero de 1870), que marcó en los años setenta un nuevo centro de gravedad de la investigación física. Su dedicación a la física era absorbente cuando en octubre de 1868 se le puso al alcance de la mano la cátedra de física en Bonn, nombramiento que se frustró por motivos salariales.

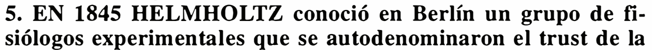
Apenas un año después se planteó en Berlín la sucesión de Heinrich Gustav Magnus, para cuya cátedra de física Du Bois-Reymond defendió a su amigo de Heidelberg. El 7 de abril de 1870 Helmholtz, ante la "noticia de la muerte del pobre Magnus", le respondía: "Es muy amable por tu parte que en estas circunstancias pienses en mí. He de decirte que desde el nombramiento de Bonn, por el que me había vuelto a sumergir, durante el largo tiempo de espera, en los estudios físicos y matemáticos, siento... absoluta indiferencia por la fisiología; sólo me atrae la física matemática. Puedo pasarme a la física cuando sea oportuno."

¿A qué se debe ese cambio de orientación? De acuerdo con la explicación al uso, la fisiología se había extendido tanto, desde 1860, que era imposible de abarcar por uno solo. Además, se hallaba en pleno esplendor, mientras que la física alemana languidecía por falta de brazos jóvenes. Esta explicación, verosímil, la alimentó el propio Helmholtz. Sin embargo, las cosas eran más complejas y rozan aspectos personales de la psicología del investigador. No más tarde de 1867/68, el principal motivo que guiaba las investigaciones del kantiano Helmholtz —la demostración de que la causalidad no tenía límites en la naturaleza— había llevado a los fisiólogos, siguiendo su guía, hasta la meta: parecía que se había conseguido la refutación del vitalismo. Helmholtz veía en la física retos mucho mayores. Era consciente de la sólo "muy incompleta aproximación" del investigador "a la realidad". El objetivo principal del conocimiento físico debía ser la paulatina confluencia de teoría y empirismo.

El camino emprendido, de la fisiología a la física en los años sesenta, se refleja también en las conferencias pronunciadas en la Asociación Científico-Médica. Entre su primera intervención, "Sobre la naturaleza de la irradiación", el 14 de diciembre de 1858, y la última, el 21 de enero de 1870, "Sobre las leyes de las corrientes eléctricas no constantes en los conductores materiales extensos", mediaron hasta treinta comunicaciones con resultados de sus investigaciones, la mayoría novedosas. Diez estaban dedicadas a temas físicos, químicos y matemáticos; todas







5. EN 1845 HELMHOLTZ conoció en Berlín un grupo de fisiólogos experimentales que se autodenominaron el trust de la física orgánica. Se proponían explicar fisicoquímicamente los procesos orgánicos. De este grupo formaban parte (*de izquier-*

éstas se acumulan en los últimos años previos a su regreso a Berlín. Desde su llegada a Heidelberg, había presidido la Asociación Científico-Médica, razón de más para que su llamada a Berlín fuese recibida con pesar. Con una conferencia titulada "Sobre la formación del sistema planetario", dirigida al público en general, Helmholtz se despidió, en un escenario decorado con hojas de laurel, del "ilustrado pueblo de Heidelberg".

"Todos los participantes", así lo describía Leo Koenisberger en 1903, "guardarán imborrablemente en la memoria las palabras que él y otros pronunciaron en aquella ocasión, pero en todos dominaba el sentimiento de que el mayor pensador e investigador de Alemania tenía que estar al lado del fundador del Reich alemán, del más poderoso de los estadistas y del más genial de los estrategas".

Se ponía así al nuevo catedrático de física junto al káiser Guillermo I —que el 13 de febrero de 1871 firmaba, todavía en Versalles, su nombramiento para la Universidad de Berlín—, al canciller Otto von Bismarck y al jefe del estado mayor general Helmuth von Moltke. Esta imagen ya anticipaba la historiografía sobre Helmholtz del tiempo de los káiseres, exagerada hasta lo grotesco.

En realidad, cuando Helmholtz asumió su función docente e investigadora en la capital tenía tras de sí todos sus grandes éxitos científicos. Ahora se le amontonaban los honores, que culminaron en 1883 con un título nobiliario.

Entre su producción científica del período de Berlín destacan los tres grandes tratados sobre la *Termodinámica de los procesos químicos* (1882-1883), donde aplica los principios fundamentales de la termodinámica al galvanismo y calcula la fuerza electromotriz de los elementos electroquímicos y de las corrientes galvánicas mediante las diferencias de concentración. La investigación electrodinámica tuvo aceptación en la época de los káiseres en gran parte gracias a estas contribuciones.

También los trabajos de epistemología y de física teórica de estos años ponen de relieve el pensamiento sistemático e integrador de Helmholtz, como se ve por ejemplo en el *Principio de acción mínima* en mecánica (1886) y en electrodinámica (1892), así como en *El pensamiento en la medicina* (1877), *Inducción y deducción* (1877) y *Las realidades en la percepción* (1878).

Si en la época de Heidelberg los discípulos más destacados fueron los fisiólogos Wilhelm Wundt y Julius Bernstein, en la época de Berlín sobresale el físico Heinrich Hertz, que colaboró con Helmholtz desde 1879 hasta 1883.

A sus 66 años se fija unos objetivos que le ocuparían durante el último período de su vida. Desde 1887 hasta su muerte se entregó a la Institución Imperial Físico-Técnica de Berlín. Junto a Werner Siemens, antes ya había sido esencial el papel que desempeñó en su fundación. Durante los siete años que ocupó la presidencia, afianzó la estructura de la institución y determinó sus áreas de trabajo.

En una memoria del año 1872 se proponía el establecimiento de una institución que promoviera el desarrollo de la mecánica de precisión en Prusia. Firmaban, entre otros, Wilhelm Foerster, Karl-Heinrich Schellbach, Du Bois-Reymond y Helmholtz. Pero la Institución no se puso en marcha hasta 1874, con la redacción de varias memorias por parte de una comisión al frente de la cual se encontraba Otto von Morozowicz, y la decisiva participación de Helmholtz y de Siemens.

Como la electrotécnica experimentaba un rápido desarrollo internacional y demandaba un sistema de medidas universal, resultó imprescindible, no más allá de principios de los años







da a derecha) **Ernst Wilhelm Brücke (1819-1892), Emil Du Bois-Reymond (1818-1896) y Carl Ludwig (1816-1894). Las fotografías fueron tomadas los años 1859 y 1860. Helmholtz** ***(a la derecha)*** **ya impartía docencia entonces en Heidelberg.**

ochenta, que se ampliara el trabajo original. En ello invirtió Helmholtz toda su autoridad. Al fin y al cabo, trabajaba desde hacía décadas en la investigación electrodinámica, había dado a conocer la teoría de Maxwell y, como miembro de la Asociación de Electrotécnica (1879) y de muchas comisiones periciales, había propiciado el prestigio de la electrotécnica. En el Congreso Internacional sobre Electricidad de 1881, declaró: "La electrotécnica se ha desarrollado progresivamente hasta tal punto, que han llegado a depender de ella ingentes capitales y representa una industria extraordinariamente próspera. En estas circunstancias es inevitable que surjan algunas situaciones conflictivas que acaben ante los tribunales, lo que pone de relieve la necesidad de una ordenación legal de las cuestiones delicadas, es decir, la fijación de unidades de medida en las que basarse."

La revolución electrotécnica de los años setenta y ochenta, que fue la culminación de intereses científicos, industriales y políticos, desempeñó un importante papel en la ampliación del proyecto de la Institución Imperial. En las conclusiones de una comisión convocada, a finales de 1882, por el ministro de Cultura de Prusia Gustav von Gossler y el general de Estado Mayor von Moltke para que preparara la constitución de un "Instituto físico-mecánico", se distinguen con claridad las caligrafías de Helmholtz, Foerster y Siemens.

Lo que se proyectaba —según el título de la memoria— era un "Instituto para el fomento experimental de la investigación exacta de la naturaleza y la técnica de precisión". Sin embargo, tuvieron que pasar casi cinco años hasta que, el 28 de marzo de 1887, el Reichstag aprobara los fondos necesarios para la Institución Imperial Físico-Técnica. En su condición de primer presidente, Helmholtz recibió una cantidad anual de 24.000 marcos, además de su salario de 6900 marcos en la Academia Prusiana de Ciencias.

Tan exorbitantes como los ingresos eran sin duda las obligaciones laborales de quien, además de tener a su cargo una Institución tan compleja, dirigía el departamento de física. Entre las tareas de los laboratorios de investigaciones eléctricas, térmicas y ópticas estaban las investigaciones físicas y mediciones de todo tipo, las pruebas de materiales y el desarrollo de métodos y aparatos de medida, así como una estrecha cooperación con el departamento técnico de la Institución Imperial.

Helmholtz no vivió lo suficiente para ver la conclusión de las obras. Otras fundaciones competidoras, como el Laboratorio Físico Nacional de Inglaterra (1900) o la Oficina Nacional de Pesos y Medidas de los Estados Unidos (1901), acreditan la proyección internacional de la Institución Imperial Físico-Técnica.

Sin embargo, los últimos años de Helmholtz estuvieron marcados también por un "aislamiento profunda y dolorosamente sentido en muchos aspectos", espirituales y privados. No pudo recuperarse de las consecuencias de una caída y de dos ataques de apoplejía. Murió el 8 de septiembre de 1894.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LETTERS OF HERMANN VON HELMHOLTZ TO HIS WIFE 1847-1859. Publicadas bajo la dirección de Richard L. Kremer. Stuttgart 1990.

HERMANN VON HELMHOLTZ AND THE FOUNDATIONS OF NINETEENTH-CENTURY SCIENCE. Publicado bajo la dirección de David Cahan. University of California Press, Berkeley 1993.

LETTERS OF HERMANN VON HELMHOLTZ TO HIS PARENTS 1837-1846. Publicadas bajo la dirección de David Cahan. Stuttgart 1993.

Robots de natación autónoma

El control instintivo de los vórtices gobierna la natación de los peces. Un atún robótico también lo ha conseguido; barcos y submarinos quizá puedan seguir su ejemplo

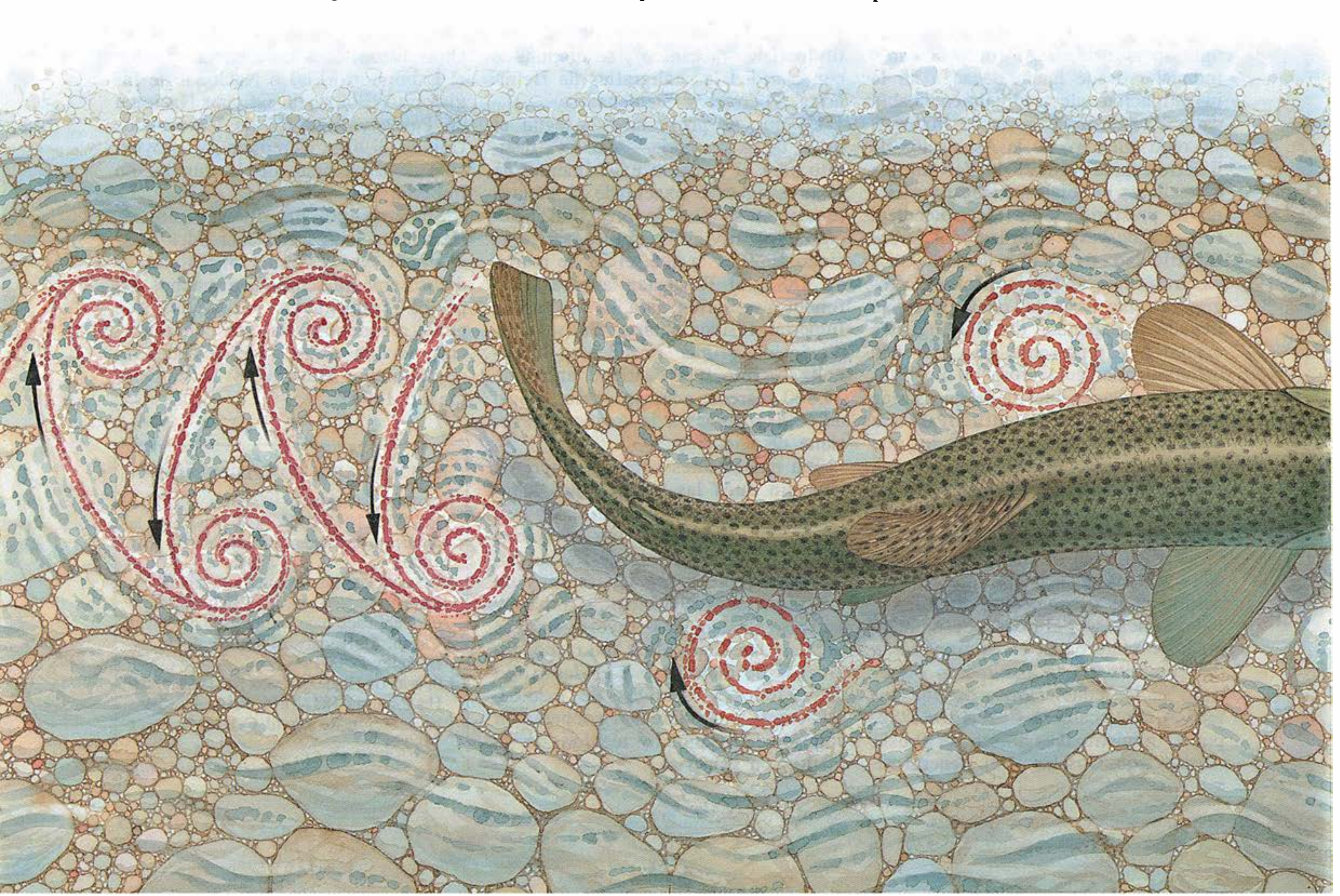
Michael S. Triantafyllou y George S. Triantafyllou

Sumergidos millones de años en un dominio inmenso y a menudo hostil, los peces han desarrollado facultades natatorias, superiores en muchos aspectos a todo lo conseguido por la ciencia y la tecnología náutica. Su instinto y la admirable esbeltez de su cuerpo les hace explotar los principios de la mecánica de fluidos de un modo que los constructores navales apenas imaginan, logrando una extraordinaria eficacia de propulsión, aceleración y facilidad de maniobra.

Los delfines, por ejemplo, hienden el agua con admirable estilo y aparente soltura, saltando juguetonamente las olas cuando siguen a barcos que navegan a 20 nudos, es decir, a 37 km/h. Aunque los datos sobre velocidad de los peces no siempre sean fiables, los biólogos marinos afirman que el atún de aleta amarilla enganchado a un anzuelo puede nadar a más de 40 nudos. El agresivo acicate va rindiendo a su presa tras breves espasmos de aceleración hasta 20 veces mayor que la de la gravedad.

Análogamente, las observaciones indican que un pez, confiado a su agilidad acuática para sobrevivir, puede invertir el sentido de su avance sin perder velocidad y girando con un radio de sólo el 10 al 30 por ciento de la longitud de su cuerpo. En cambio, una nave que maniobra debe reducir su velocidad en más del 50 % y girar con un radio al menos 10 veces mayor que el correspondiente a un pez de sus dimensiones.

No obstante, y pese a lo mucho a ganar con ello, se ha trabajado relativamente poco para identificar y aplicar las características específicas de la propulsión de los peces susceptibles de aprovecharse en naves submarinas y de superficie. Ciertamente no ha sido por falta de motivación comercial; dado el inmenso volumen de mercancías y pasajeros que cada año se transporta por barco en todo el mundo, cualquier mejora de rendimiento por pequeña que sea comporta cuantiosos ahorros de combus-



tible. La mayor facilidad de maniobra, además, podría reducir el número de accidentes y aumentar la seguridad de pasajeros, instrumentos y medio ambiente.

MICHAEL S. TRIANTAFYLLOU y GEORGE S. TRIANTAFYLLOU son hermanos, interesados por la dinámica de fluidos desde sus años de formación en la Universidad Técnica Nacional de Atenas. Michael da clases de ingeniería en el MIT y dirige la instalación del tanque de pruebas. George enseña ingeniería mecánica en el Colegio Universitario Metropolitano de Nueva York.

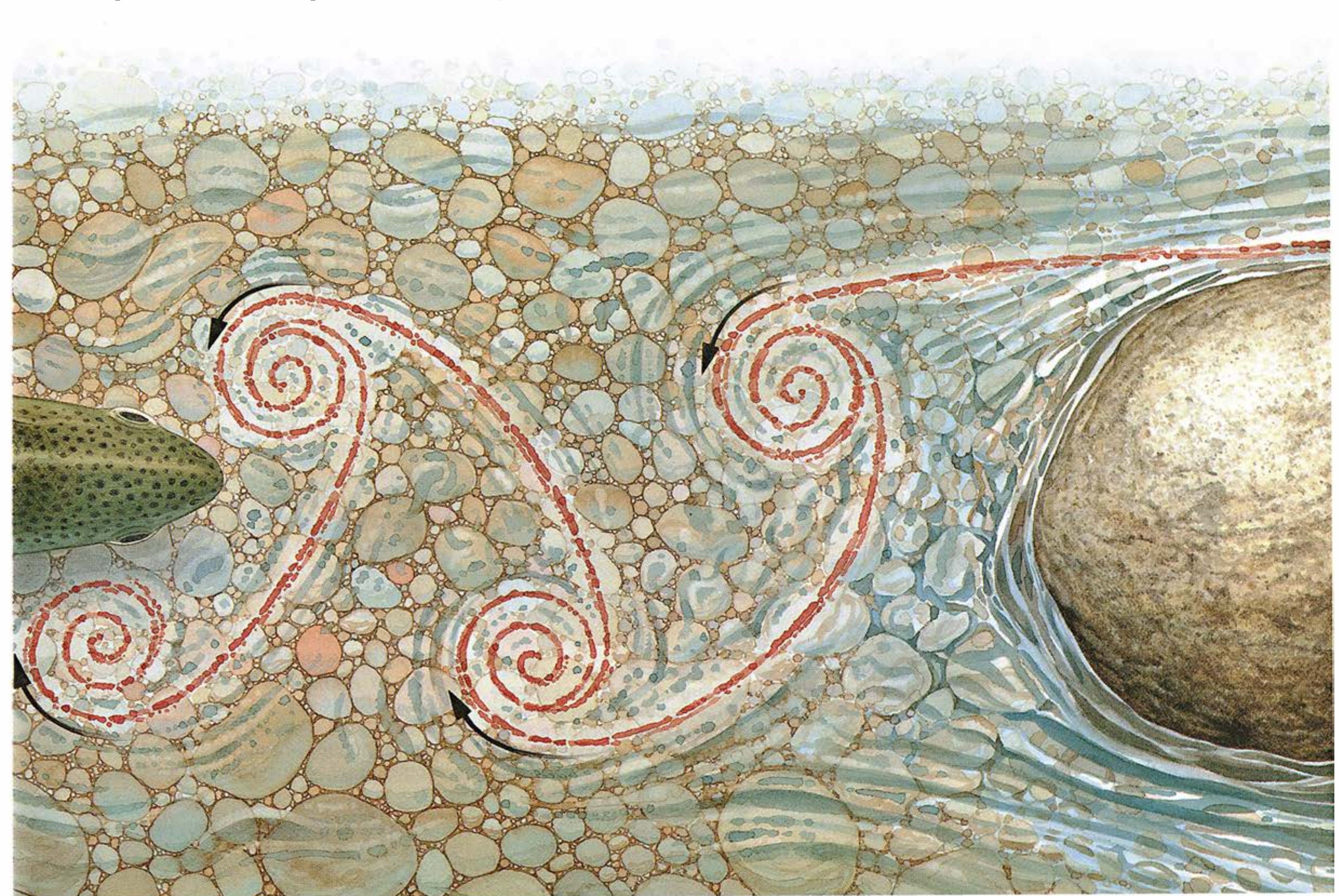
Estas posibilidades, a la vez curiosas y remotas, fueron el tema de una reunión informal mantenida en 1989 con nuestros colegas de la Institución Oceanográfica Woods Hole. Estos debates, que pudieran parecer ociosos, no cayeron en saco roto, puesto que dicho centro y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) tienen una apremiante necesidad de sistemas de propulsión acuática avanzados y eficientes. Estas dos entidades figuran entre un puñado de organizaciones de todo el mundo dedicadas al desarrollo de máquinas robotizadas, de natación autónoma, que puedan algún día explorar fondos oceánicos, emprender misiones militares y ayudar a mantener plataformas petrolíferas marinas. Las rigurosas limitaciones en cuanto a la energía almacenada a bordo de estos vehículos "subacuáticos autónomos" exigen unos propulsores de mayor rendimiento que las hélices actuales.

Este desarrollo, sin embargo, iba a ser conflictivo. Resulta imposible reproducir el comportamiento de un pez mediante la simple imitación de su forma y actuación, puesto que el estado de la robótica actual no permite construir un vehículo que pueda arquearse de un modo uniforme y continuo con un cuerpo semejante al del pez. Con todo, la recompensa del esfuerzo prometía ser generosa.

El equipo de los autores está formado por Mark Grosenbaugh, de Woods Hole, Dick K. P. Yue, del MIT, amén de alumnos y colaboradores directos nuestros, en particular, Knut Streitlien y David S. Barrett. Nuestro trabajo complementa los estudios biológicos de Lawrence C. Rome sobre la energía que consumen los músculos del pez, las mediciones de Richard W. Blake sobre la reacción de arrancada rápida al clavarse un anzuelo o arpón, y la investigación de Paul W. Webb sobre estabilidad natatoria de los peces.

Empezamos por construir unas sencillas palas cuyo modo de cortar el agua se asemejara al de la cola del pez con aproximación suficiente para poder deducir nuevas conclusiones sobre el papel desempeñado por los remolinos en una natación eficaz. Alentados por tales resultados, construimos una réplica pormenorizada de un atún (*Thunnus thynnus*). Denominamos RoboTuna a este mecanismo robótico, con un cuerpo de ocho secciones y una cola, que nos permitió afinar todavía más nuestras conclusiones y nos sirvió de prototipo para el modelo de natación autónoma que ahora estamos diseñando.

A la hora de proyectar estas máquinas nos apoyamos en una larga serie de estudios teóricos, experimentales y biológicos sobre la forma de nadar de los peces. En 1936 el zoólogo británico James Gray armó un revuelo calculando la potencia que



1. AL ENCONTRARSE FRENTE A VORTICES el pez detecta variaciones de presión cuando éstos recorren su flanco. Para extraer energía de ellos y así mejorar su eficacia natatoria, el pez regula en tiempo el batido de su cola para crear vórtices que giran en sentido opuesto y debilitan los encontrados a su paso.

MARGEN OPTIMO TEORICO

TRUCHA ARCO IRIS

TIBURON

BACALAO

SALMON DE ALASKA

CABALLA

TRUCHA MARRON

DELFIN

PAGEL

0,2 0,3 0,4

NUMERO DE STROUHAL



2. TODOS LOS PECES agitan su cola para crear vórtices que producen un chorro de alto rendimiento propulsor. Los parámetros esenciales que describen el chorro están relacionados por el número de Strouhal, que se define como el producto de la frecuencia de batido de la cola (*flechas amarillas*) por la anchura del chorro (*púrpura*), dividido por la velocidad del pez (*rojo*). Un número de Strouhal entre 0,25 y 0,35 indica una natación eficiente.

necesitaría un delfín para desplazarse a 20 nudos, como se ha comprobado que hacen algunos. Gray supuso que el delfín, en su movimiento, ofrecía la misma resistencia que un modelo rígido, y estimó la potencia que podrían suministrar sus músculos. Su conclusión, la llamada paradoja de Gray, fue que el delfín era algo así como siete veces demasiado débil para alcanzar tales velocidades. La única explicación posible es que los mecanismos de circulación de corriente que operan en torno del cuerpo del delfín disminuyen en un factor de siete su resistencia al avance.

A los 60 años de su formulación, la paradoja de Gray todavía no ha sido confirmada ni desmentida. (Las pruebas biológicas e hidrodinámicas necesarias requieren una precisión inalcanzable en el estado actual de la técnica en ambos terrenos.) Pero ha suscitado numerosos estudios y conseguido formar un cuerpo básico de resultados teóricos y experimentales relativos a la natación de los peces. Pese a todos los estudios y ensayos, sin embargo, apenas puede encontrarse alguna técnica útil que guarde relación, siquiera indirecta, con el modo de nadar de los peces. En anteriores intentos, aunque su base teórica fuera sólida, los mecanismos de emulación natatoria trabajaron con muy bajo rendimiento. Dadas las notables facultades del pez dentro del agua, esto sí que nos pareció una paradoja.

Si un pez es una máquina nadadora tan eficiente como suele creerse, su propulsor primario —la cola— debe tener una gran eficacia. Sin embargo, los resultados de anteriores experimentos donde se utilizaban colas semejantes a las del pez habían sido muy malos. Intrigados por ello, nos propusimos encontrar las razones de tal comportamiento.

En un vehículo accionado por motor, se llama rendimiento al cociente de dividir la potencia útil (el empuje o fuerza impulsora multiplicada por la velocidad de avance) entre la potencia suministrada por el motor para mover la pala o hélice. En el caso ideal, la potencia del motor se convertiría íntegramente en propulsión, con lo que el rendimiento sería uno. En la práctica, será siempre menor que la unidad, puesto que una parte de la potencia del motor se desperdicia en caprichosos vórtices y otras turbulencias indeseables producidas a su paso, y además en calor. El factor más importante en cuanto a las prestaciones es el rendimiento del propulsor a niveles de impulsión razonablemente elevados; de nada sirve

un dispositivo que sólo pueda entregar pequeños valores de empuje aunque su rendimiento sea alto.

Todo objeto que se desplaza en una corriente, ya sea un hilo arrastrado por el viento o un pez espada que nada en el mar, va dejando un rastro de vórtices o remolinos giratorios. El hilo obstruye la corriente y deja una estela, mientras que la cola del pez empuja el agua hacia atrás y crea un "chorro": una columna de fluido en movimiento que encierra vórtices productores de empuje. Llegamos al convencimiento de que estos remolinos desempeñan un papel esencial en la generación de la fuerza impulsora, y sostuvimos que su formación óptima aumentaría enormemente el rendimiento.

Por estudios ya realizados sobre los vórtices que crea un alambre en el seno de una corriente de aire, conocíamos bien un parámetro de la dinámica de fluidos llamado número de Strouhal. Se halla éste multiplicando la frecuencia de formación de vórtices tras un objeto inmerso en la corriente por la anchura de la estela, y dividiendo por la velocidad de dicha corriente. En pocas palabras, ese número indica con qué frecuencia se crean remolinos en la estela y cuán próximos están entre sí. Importa observar que la relación se mantiene cercana a 0,2 para muy diversas condiciones de flujo y formas de objetos.

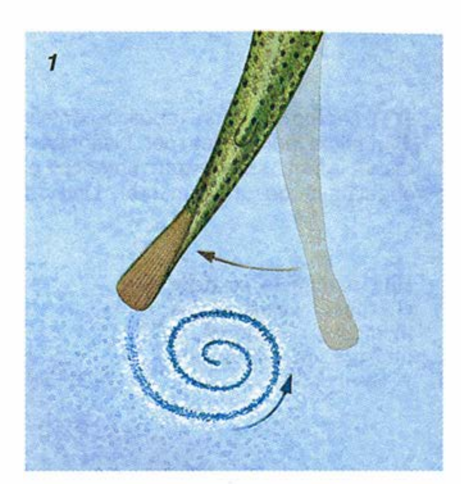
Aunque el número de Strouhal se concibió para describir las estelas que siguen a las obstrucciones de un flujo, comprendimos que podía emplearse también para describir chorros, dada la gran semejanza que existe entre éstos y las estelas. Para un pez que nada, definimos el número de Strouhal como el producto de la frecuencia con que la cola bate el agua por la anchura del chorro, dividido por la velocidad del pez.

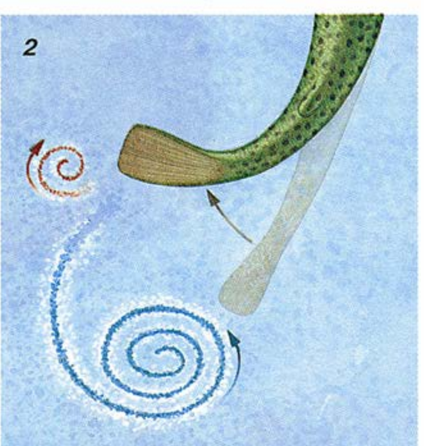
Los datos obtenidos al hacer batir las aletas revelan que la formación de vórtices es óptima para crear empuje cuando el número de Strouhal está comprendido entre 0,25 y 0,35. El rendimiento de una aleta batiente es máximo dentro de ese margen, como habíamos previsto en nuestro estudio y también confirmaron las experiencias en el tanque de ensayos del MIT.

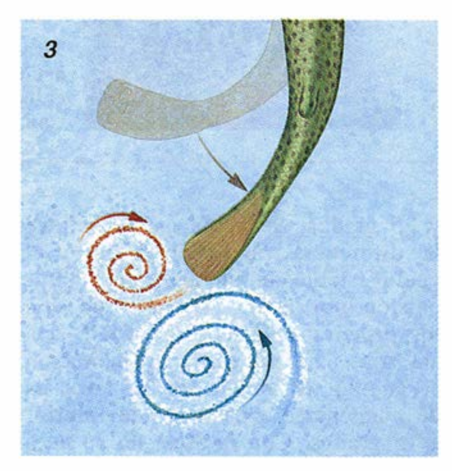
Con la colaboración de Grosenbaugh, analizamos seguidamente una gran cantidad de datos recopilados sobre la natación de los peces. Descubrimos que individuos de todos los tamaños, desde ejemplares de acuario hasta tiburones, baten la cola de tal modo que el número de Strouhal se mantiene en ese margen de 0,25 a 0,35 determinado teóricamente. Para mostrar la formación de remolinos y turbulencia, realizamos una prueba separada colocando un pececillo tropical dentro de un fluido que contenía en suspensión diminutas partículas. Midiendo la velocidad del pez, así como la frecuencia y amplitud del batido de su cola, calculamos un número de Strouhal de 0,30. Satisfechos ya en cuanto a la importancia de este parámetro para elevar el rendimiento, calculamos el valor que tenía en los ensayos anteriores de resultados tan deficientes. En ninguno de ellos se acercaba al margen de 0,25 a 0,35. Vueltos al laboratorio con renovado entusiasmo, nos pusimos a ajustar las aletas de los modelos para que trabajasen dentro de ese margen, y obtuvimos rendimientos superiores al 86 %. Por el contrario, las pequeñas hélices que impulsan a los vehículos submarinos no suelen pasar del 40 %.

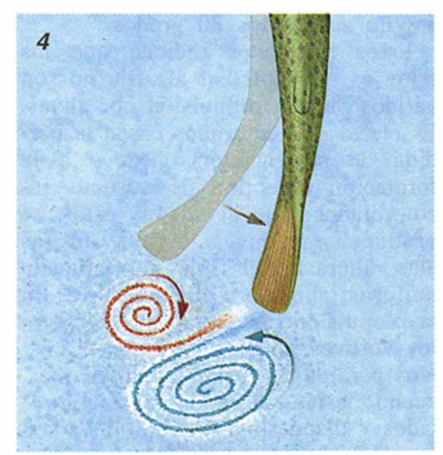
El origen del alto rendimiento y vigoroso empuje que consigue una aleta (o la cola de un pez) está en el modo de colocarse los remolinos que se forman tras de ella. Estos vórtices se intensifican a medida que aumenta la carga, pero su dirección de giro siempre es compatible con la dirección de avance deseada, produciendo un chorro eficaz. En cambio, una hélice genera un largo chorro que va girando en el mismo sentido que la hélice, es decir, perpendicular a la dirección del avance y del empuje necesario. Toda la energía invertida en hacer girar ese chorro se desperdicia. La única manera de reducir la pérdida al mínimo y elevar el rendimiento consiste en aligerar mucho la carga de la hélice, dándole el mayor diámetro posible.

Otro interesante resultado de estos experimentos se refiere a la relación entre rendimiento y "ángulo de ataque", que es el ángulo instantáneo de la dirección de movimiento de una aleta con el plano que forman sus bordes anterior y posterior. Según nuestros ensayos, el rendimiento óptimo se alcanzaba cuando el ángulo de ataque máximo estaba entre 15





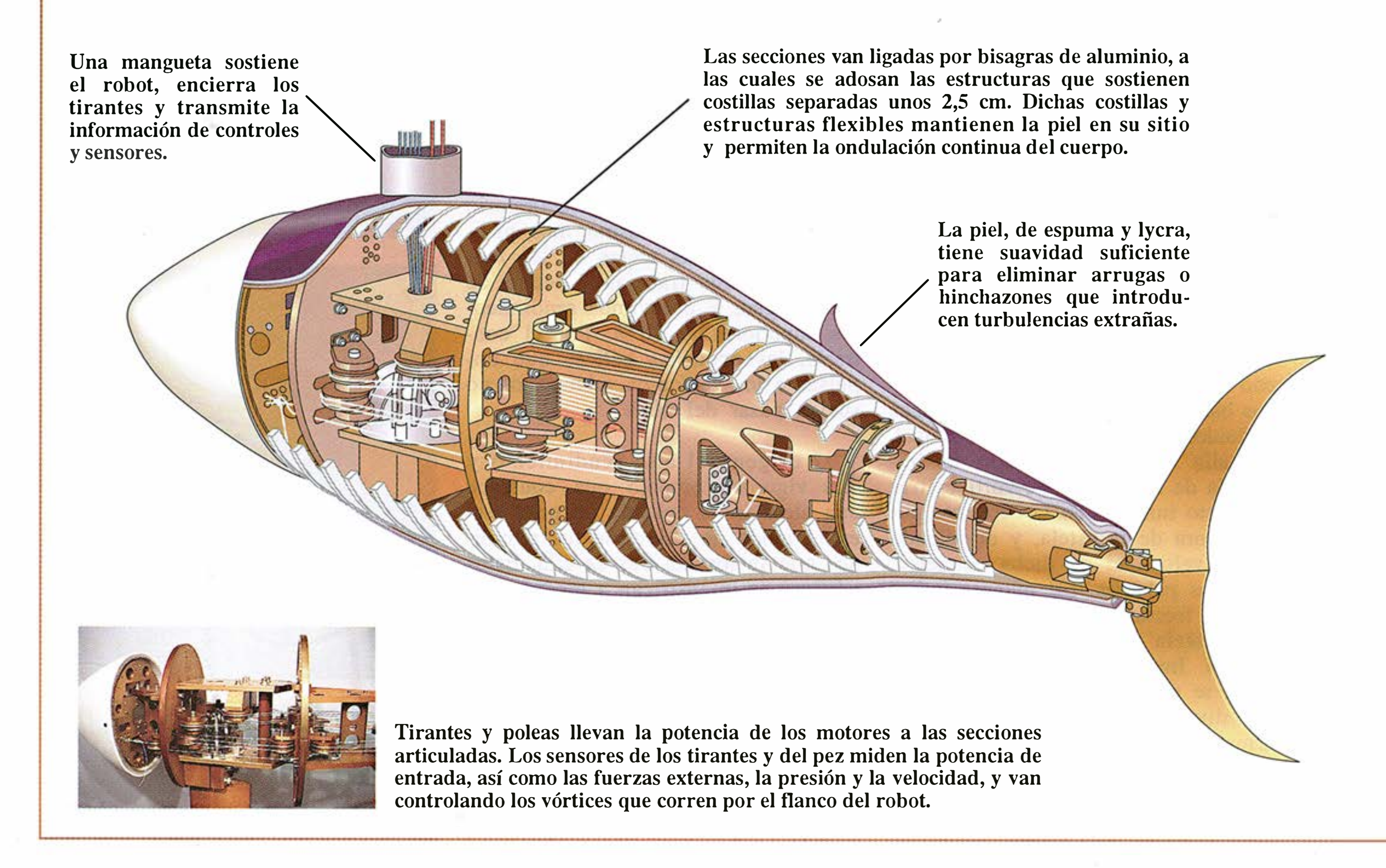




3. UN VIGOROSO ALETAZO, seguido rápidamente por otro en dirección inversa, produce un impulso fuerte y repentino, muy adecuado para capturar una presa o escapar de un peligro. El aletazo inicial produce un gran vórtice (*1*), y el segundo un vórtice distinto que gira al revés (*2, 3*). Cuando ambos vórtices se encuentran y combinan creando un chorro, producen un fuerte empuje hacia adelante y una fuerza lateral no deseada aunque tolerable, siendo apartados de la cola y debilitándose mutuamente (*4*).

Un atún de aluminio y lycra

El cuerpo del atún robótico consta de secciones de aluminio articuladas por bisagras. Seis motores, exteriores al robot, suministran potencia para imitar la natación ondulatoria de un atún real. Unos sistemas de tirantes y poleas transfieren el par de fuerzas de cada motor, al tiempo que aíslan el movimiento de las secciones. Al nadar en el tanque de pruebas de ingeniería oceánica del MIT, el robot va suspendido de un carro (*fotografía a la derecha*).



y 25 grados. Se ponía así de relieve la diferencia fundamental entre el vuelo estable de un avión y la propulsión por aletas. De acuerdo con los principios básicos del vuelo con ala fija, para no perder sustentación el ángulo de ataque de las alas ha de mantenerse sensiblemente inferior a 15 grados. Con la aleta no se notó pérdida de sustentación hasta que el ángulo superó los 30 grados.

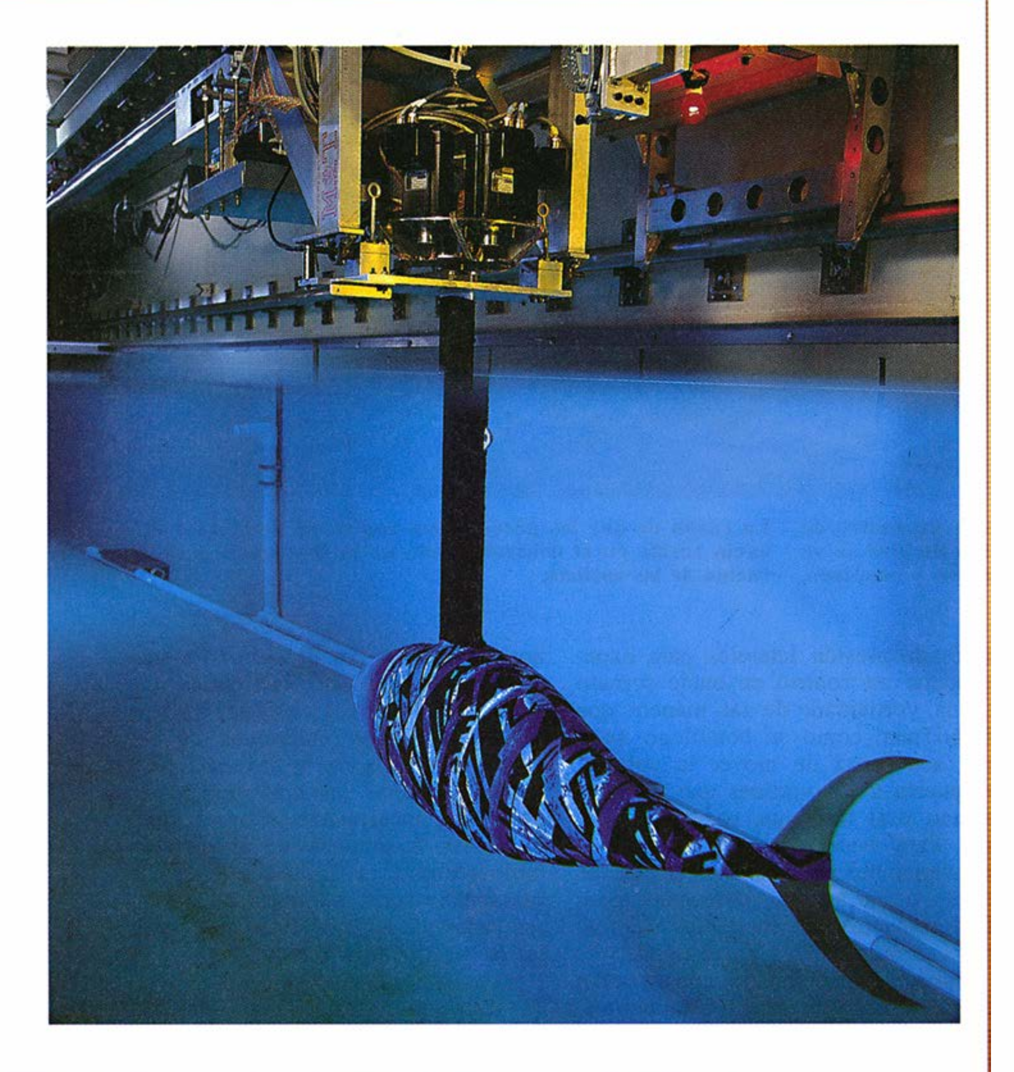
Estos resultados indican que los criterios aplicables al ala fija no son válidos para la propulsión por aletas. Es cierto que en ambos casos la pérdida de sustentación obedece a la formación repentina de vórtices incontrolados. En el avión, éstos se producen encima y detrás de las alas, alterando el flujo normalmente uniforme que sobre ellas discurre. En la propulsión por aleta, sin embargo, los vórtices no producen por sí mismos pérdida de sustentación. Es más, cuando están adecuadamente controlados y dispuestos, los remolinos son esenciales para el eficaz funcionamiento de la aleta, y no debe extrañar que puedan controlarse en un margen de ángulos más amplio para producir un empuje aprovechable.

De los hallazgos descritos, unidos a los que afectan al número de Strouhal, se desprende que una buena aleta puede ser un eficaz propulsor para barcos, yates a motor y vehículos submarinos. Por sus ventajas naturales y porque la técnica actual está capacitada para desarrollar los motores y sistemas de transmisión necesarios, podría esta aleta ser la primera aplicación técnica inspirada en los peces. El uso de un número par de aletas en movimiento contrapuesto, convenientemente situadas, podría reducir al mínimo vaivenes y vibraciones. Por supuesto, los futuros constructores de tales naves tendrán que considerar la fiabilidad estructural, la forma hidrodinámica de la popa y otras variables.

La coincidencia de fuerte empuje y alto rendimiento no es la única ventaja de las aletas batientes. Se abren también posibilidades de un funcionamiento más flexible, de mayor capacidad de maniobra y, lo que encierra mayor sorpresa, la tentadora oportunidad de recuperar de la estela energía cinética.

Los peces ejercen instintivamente un control preciso y eficaz del flujo que les rodea para extraer energía de las olas, las turbulencias e incluso de sus propias estelas. También han desarrollado con el tiempo formas de controlar dicho flujo para dar vigor a sus giros y arrancadas. Para ello se basan en principios que no son exclusivos de su grupo, ni siquiera de la propulsión por aletas. En efecto, una hélice montada en un barco es más eficiente que otra probada dentro de un depósito, puesto que la hélice en movimiento recupera parte de la energía de la estela. El diseño naval aprovecha este fenómeno.

Es, sin embargo, evidente que se adaptan mucho mejor a este tipo de control los peces, animales marinos y



sus imitaciones mecánicas. Los delfines que juguetean y saltan en la estela de los barcos durante millas, recuperan energía al posicionar su cuerpo y batir su cola de manera apropiada, como ya advirtiera Gray hace decenios y estudiara más recientemente Neil Bose. Los peces pueden, además, recuperar energía de los vórtices oceánicos e incluso de los que provocan sus propios cuerpos.

La extracción de energía de corrientes inestables por medio de una pala estacionaria se denomina efecto Katzmayr, en homenaje al ingeniero alemán que la abordó en 1927. En 1991 investigamos un fenómeno afín colocando una aleta batiente a cierta distancia tras un cilindro inmerso en una corriente. Los remolinos creados por el cilindro avanzaban en sucesión hacia la aleta, la cual podíamos inclinar y desplazar lateralmente para recibirlos en distintas posiciones. Mediante ensayos sistemáticos se confirmó que tales ajustes aumentaban o disminuían el rendimiento.

Cuando la distribución de tiempos es la correcta, los vórtices creados por las oscilaciones de la aleta se encuentran con otros vórtices que giran en sentido opuesto. Su combinación debilita los vórtices de la estela, con lo que la aleta capta energía y eleva su rendimiento. Es obviamente el modo más deseable de conseguir aceleraciones o altas velocidades de natación, pero hay otros dos posibles con los mismos elementos. Desplazando algo los tiempos, se crean vórtices que giran en el mismo sentido y que, al encontrarse, se refuerzan mutuamente y producen una fuerte corriente de chorro. En una tercera situación, se emparejan vórtices girando en sentidos opuestos para crear contracorrientes en forma de seta; si las generase la cola de un pez, tendrían el efecto de frenar su avance. En total, pudimos variar el rendimiento de la aleta al menos en un factor de dos, en función del modo elegido.

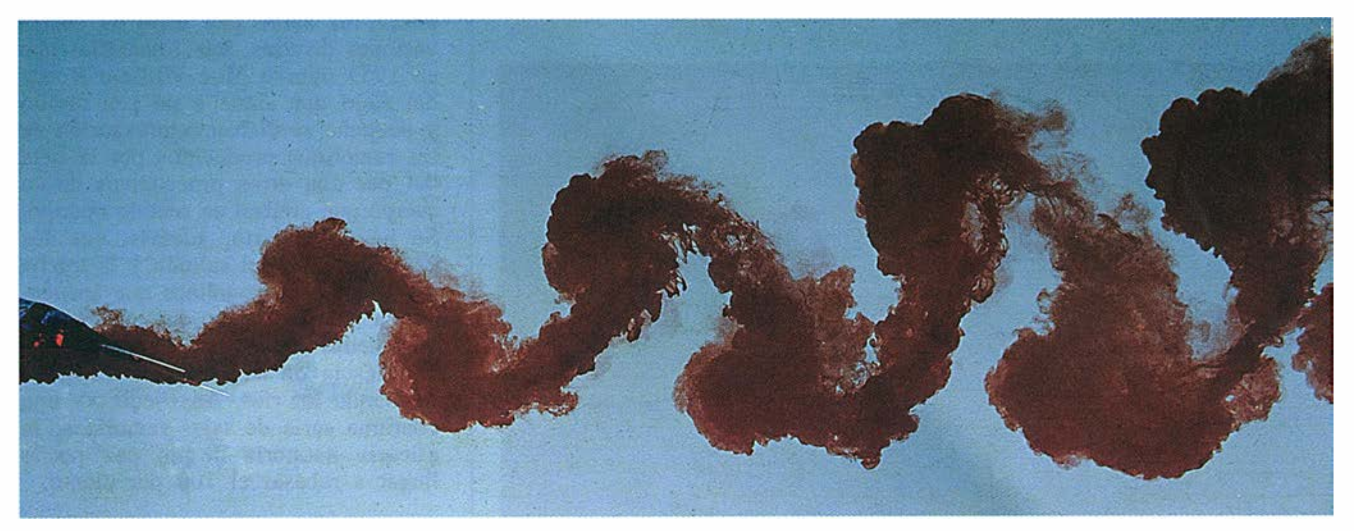
Este conjunto de pruebas arrojó nueva luz sobre una serie de observaciones diversas. Las fotografías que en 1959 obtuvo Moe William Rosen del flujo que sigue a un pez rápido y pequeño revelaban la interacción de los remolinos producidos por la cola del pez con otros procedentes de su cuerpo que giraban en sentido opuesto. Se ha descubierto, además, que los peces del tipo del salmón y la trucha aprovechan los remolinos que encuentran a su paso, como los que se forman detrás de las rocas, para reforzar la eficacia de su ardua natación remontando los ríos. Auxiliado por una continua serie de tales remolinos, la eficacia natatoria de un pez puede llegar a rebasar el 100 por ciento.

El control de la vorticidad es, asimismo, la clave del asombroso comportamiento transitorio de ciertos peces, cuyas veloces arrancadas, bruscas aceleraciones y maniobras aventajan en mucho a las de barcos y submarinos. Tal agilidad es fruto de la capacidad de producir fuerzas repentinas y de gran magnitud. Por otro lado, los barcos y submarinos no ejercen control alguno sobre el flujo acuático en torno de su casco y se mueven a ritmo lento, formándose en su amplísima estela vórtices incontrolados que crean enormes fuerzas de resistencia al avance.

El control de los remolinos ofrece una solución novedosa: producir gradientes de presión favorables y controlarlos luego para optimizar la respuesta. Específicamente, inclinar y alzar una aleta hasta un ángulo máximo y dejarla luego regresar a su posición produce una fuerza intensa y repentina, ideal para las maniobras y arrancadas rápidas. El movimiento da origen a un gran remolino inicial, al que sigue muy pronto otro que gira en sentido opuesto. Cuando este segundo vórtice queda atrapado por breves instantes entre el primero y la superficie de la lámina, se produce un súbito impulso hacia adelante, además de una fuerza lateral.

Esta maniobra reproduce fielmente lo que un pez ágil y veloz hace con la cola. Antes de salir lanzado en cierta dirección, arquea ostensiblemente su cuerpo, formando la mitad anterior del mismo un ángulo de 60 a 120 grados con la dirección final del movimiento. Necesita esta orientación para compensar la fuerza lateral que acompaña al impulso.

Por muy útiles que hayan sido las aletas batientes para analizar la hidrodinámica natatoria de los peces, la verdadera prueba de los principios teóricos, así como el primer paso para la transferencia tecnológica, con-



4. LA COLA DEL ATUN ROBOTICO deja un rastro de vórtices, visibles por el teñido, cuyo sentido de giro se va alternando a medida que la cola bate hacia uno y otro lado. La razón de que los peces naden con tanta presteza y eficacia reside en el control exacto de la frecuencia y separación de los vórtices.

siste en la construcción de un pez artificial que utilice tales aletas para nadar. Hace ya dos años que nos decidimos a acometer esta empresa. El pez elegido como modelo fue el atún por su conocida aptitud para largos viajes; además cabe holgadamente en el tanque de pruebas del MIT.

El cuerpo y la cola de este artefacto de 125 centímetros, que hemos llamado RoboTuna, flexionan por acción de un mecanismo de ocho secciones articuladas de aluminio anodizado, gobernadas por seis motores sin escobillas y un conjunto de tirantes y poleas. Un armazón de "costillas" muy apretadas y una piel especial de espuma reticulada ajustada con lycra permite una flexión gradual y mantiene en el mínimo las turbulencias parásitas. El artefacto entero está unido a un carrito en el que van montados todos los motores y equipos de comunicación y control. Los cables de datos y alimentación se alojan en una sola mangueta.

A lo largo del flanco de RoboTuna se han colocado sensores que registran la presión de la corriente, justo como los peces detectan las variaciones de presión mediante los órganos sensores de su línea lateral. Merced a estos sensores y a los transductores de fuerza y de movimiento, es posible determinar las fuerzas natatorias y el rendimiento de la propulsión. La medición simultánea de las fuerzas permite establecer una relación directa entre las características del flujo y la efectividad de la natación, y además controlar el flujo para potenciar la propulsión y capacidad de maniobra del modelo. Esperamos poder muy pronto utilizar los transductores de presión laterales para experimentar un control en bucle cerrado de la vorticidad, de tal manera que RoboTuna, como su homólogo natural, sea capaz de mover la cola en respuesta a los vórtices que se aproximan y al flujo que rodea su cuerpo. Para hacer visible la corriente alrededor del pez robótico utilizamos tintes o un haz de láser que torna fosforescentes las partículas microscópicas suspendidas en el agua.

Esperamos iniciar la construcción de un modelo de natación autónoma, que se aproveche de la técnica del robot existente. Este modelo de segunda generación servirá para desarrollar técnicas aún más avanzadas, basadas en una mejor comprensión de los mecanismos de control de flujo, susceptibles de aplicarse a naves comerciales y de otros tipos.

Y lo que es más importante, con ello tendremos un nuevo banco de ensayo para mejorar la maniobrabilidad y rapidez de arrancada de vehículos en los que se generen y manipulen velozmente grandes vórtices o remolinos. Estas aptitudes resultarán de inestimable valor, incluso para la investigación oceanográfica, que a veces trabaja en entornos hostiles o confinados. En las proximidades de conductos térmicos, las temperaturas pueden dispararse a cientos de grados al recorrer escasos metros o transcurrir muy pocos segundos. Asimismo, cuando hay numerosas obstrucciones, la agilidad puede evitar una colisión o un fallo catastrófico.

Cuanto más se refina y esquematiza nuestro diseño del atún robotizado, más nos admira su modelo viviente. Conscientes de que nunca igualaremos la perfección de esta criatura real, nos esforzamos por descubrir los mecanismos naturales que han optimizado millones de años de evolución. Una vez identificados, podremos aplicar cierta ingeniería "a la inversa" para concebir nuevas maneras de aprovechar estos mecanismos. Con el tiempo, estas creaciones de inspiración biológica pueden llegar a aventajar a sus predecesores naturales en aspectos útiles, como, por ejemplo, vigilar un tramo del fondo marino.

Esta es la meta a la que apunta la biomímesis, ciencia hoy emergente. Si se concentran los esfuerzos de investigación y se eligen bien los parámetros, conocer detalles del comportamiento y los instintos de seres bien adaptados a su medio puede ser de gran valor para el desarrollo de robots y otros sistemas útiles. Nuestro proyecto nos ha obligado a formular y responder preguntas fundamentales sobre la mecánica de la natación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOCOMOTION BY SCOMBRID FISHES: HYDROMECHANICS MORPHOLOGY AND BEHAVIOR. J. J. Magnuson en *Fish Physiology*. Dirigido por W. S. Hoar y D. J. Randall. Academic Press, 1978.

OPTIMAL THRUST DEVELOPMENT IN OSCILLATING FOILS WITH APPLICATION TO FISH PROPULSION. G. S. Triantafyllou, M. S. Triantafyllou y M. A. Grosenbaugh en *Journal of Fluids and Structures*, vol. 7, n.º 2, págs. 205-224; febrero de 1993.

ACTIVE VORTICITY CONTROL IN A SHEAR FLOW USING A FLAPPING FOIL. R. Gopalkrishnan, Michael S. Triantafyllou, George S. Triantafyllou y David Barrett en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 274, páginas 1-21; 10 de septiembre de 1994.

Madhusree Mukerjee

YOICHIRO NAMBU: soñador de cuerdas y gluones

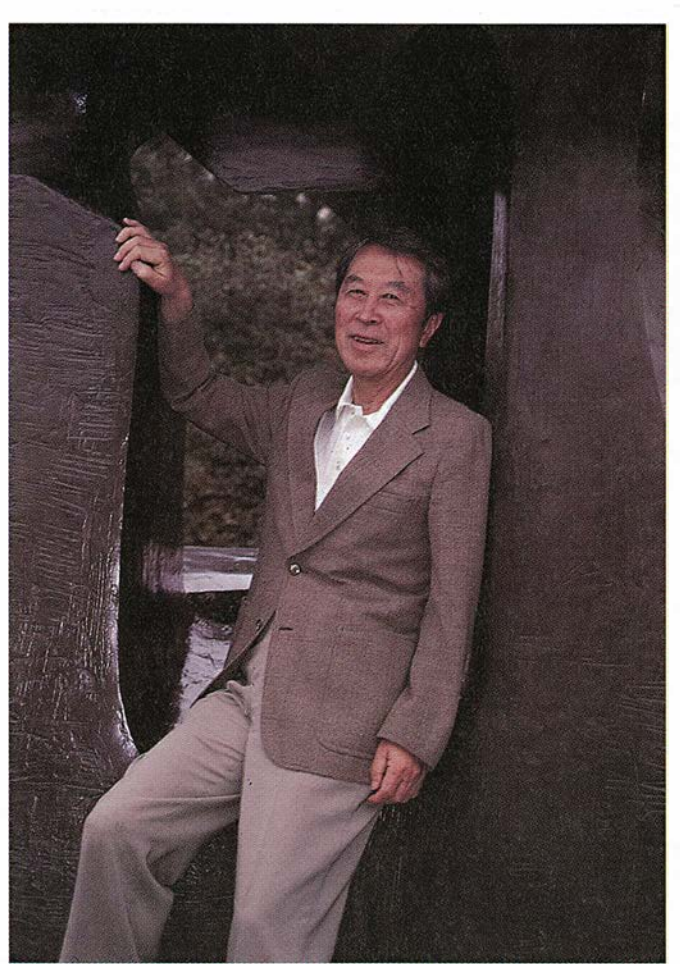
Conocí a Yoichiro Nambu hace unos 10 años en la Universidad de Chicago. Bajito, vestido con un pulcro traje, iba trazando en la pizarra largos y serpenteantes tubos. Unas veces decía que eran líneas de vórtices que aparecen en los superconductores; otras, que eran cuerdas que conectan los quarks. Fascinada por su forma de vincular mundos tan dispares, le pedí más tarde que fuera mi director de tesis.

No resulta fácil acabar de entenderlo. Tampoco era yo la primera en intentarlo. Bruno Zumino, de la Universidad de California en Berkeley, resumía así su propio esfuerzo: "Estaba convencido de que si supiera qué pasaba por la mente de Nambu en ese momento, le sacaría una ventaja de 10 años. Así que hablé con él durante mucho tiempo. Pero, para cuando me aclaré con lo que me había dicho, habían pasado 10 años."

Nambu observó que, cuando un sistema físico —un superconductor o un océano de quarks— desafía la simetría impuesta por las leyes de la física, se crea una nueva partícula. Junto con Moo-Young Han, propuso la existencia de los gluones, los objetos que mantienen juntos los quarks. También se dio cuenta de que los quarks actúan como si estuvieran unidos por cuerdas, una idea que supuso el fundamento de la teoría de las cuerdas.

Puede que las raíces de la originalidad de Nambu se encuentren en una niñez singular en el Japón de la preguerra. Nació en Tokyo en 1921. Kichiro Nambu, su padre, se había escapado de casa, en Fukui, para ir a la universidad y allí se encontró a Kimiko, la que sería su mujer. Un terremoto le obligó a retornar al hogar paterno. Dando aún muestras de una actitud desafiante, Kichiro se hizo maestro de escuela y construyó su casa en las afueras de la ciudad, que le salvaría más tarde de los bombardeos aliados.

En aquella época, Fukui se enorgullecía de poseer la escuela más militarista del Japón. Los chicos, uniformados, aprendían a desfilar, disparar y saludar. En pleno invierno, Yoichiro se levantaba a las cuatro de la madrugada y recorría los dos kilómetros que le separaban de la escuela para aprender el arte samurai de la esgrima, descalzo sobre el frío suelo. Pero a medida que se iba desarrollando comprendió que las opiniones anticonvencionalistas de su padre eran peligrosas en un Japón cada vez más abocado a la guerra.



YOICHIRO NAMBU encontró que la naturaleza, para reparar la rotura de la simetría, crea una nueva partícula.

Así aprendió Nambu a guardarse para sí sus opiniones. Ese rasgo de su carácter le fue de gran ayuda en el ejército y en el ambiente científico. Puede que su originalidad provenga de tener que reflexionarlo todo, de estar al corriente de todas las ideas del mundo que le rodea pero sin dejarse arrastrar por ninguna.

A los dieciséis años se trasladó a Tokyo. Encontró allí una atmósfera intelectual más libre y educados compañeros que imponían respeto al chico de pueblo. La física se le atragantó. "No entendía la entropía y suspendí la termodinámica." Pero Nambu —quizás influenciado por Hideki Yukawa, descubridor de la transmisión de fuerza por las partículas— decidió estudiar la carrera de física en la Universidad de Tokyo.

Entre sus nuevos compañeros había algunos radicales clandestinos. Japón estaba en guerra con China. "Nos contaban las victorias", dice Nambu, "pero esos comunistas se enteraban también de las masacres y las derrotas". El paso por las aulas se acortó: el curso se licenció con seis meses de antelación para que pudieran ser reclutados.

En el ejército, Nambu cavó trincheras y acarreó barcas. "Físicamente, era duro", admite, "pero por dentro era libre. Con tal de que dijeras: 'a sus órdenes, a sus órdenes', te dejaban en paz". Un año después le dieron un nuevo destino: ayudar en el desarrollo del radar de onda corta. La armada disponía ya de tal radar, pero el ejército no confiaba en ese equipo. Tampoco el grupo de Nambu tuvo mucho éxito: "Para poner a prueba nuestro sistema, lo emplaza-

mos en la cima de una colina y alquilé una barca para llevar una barra de metal mar adentro. Se podía distinguir a simple vista, pero nuestro radar no la detectaba."

Se le ordenó entonces que robara un documento secreto de la armada, un artículo sobre teoría de campos escrito por Sin-Itiro Tomonaga, que aplicaba sus descubrimientos sobre las ondas de las partículas a las guías de onda del radar. (Las publicaciones de Werner Heisenberg sobre la teoría de campos habían llegado desde Alemania poco antes, tras un periplo de un año en submarino.) Obtuvo esos artículos y así entró en contacto con algunas de las ideas más recientes de la física.

Tras la guerra, Nambu y Chieko Hida se casaron. Empezó a trabajar en Tokyo en la plaza de investigador concedida hacía tiempo.

"Siempre estaba con hambre", recuerda. Encontrar comida le llevaba la mayor parte de la semana. Durante el resto del tiempo, pensaba en la física, escribiendo sus cálculos en rollos de papel de caja registradora. Ziro Koba, compañero de despacho y alumno de Tomonaga, mantenía a Nambu al corriente del trabajo de su jefe. Un grupo que trabajaba en física del estado sólido en las dependencias contiguas le proporcionaron también una estimulante compañía.

Todo lo que estos investigadores conocían de los desarrollos científicos en el mundo occidental provenía de algunos números esporádicos de la revista *Time*. Más tarde, las revistas científicas de una biblioteca instalada por las fuerzas de ocupación ayudaron a rellenar los huecos. Pero a los físicos japoneses les quedaba mucho por reinventar. A veces llegaron antes. Después de trasladarse a la Universidad de Osaka en 1949, Nambu publicó una fórmula que describe cómo se enlazan dos partículas, conocida hoy como la ecuación de Bethe-Salpeter. Junto con otros, predijo también que las partículas extrañas debían crearse en parejas, hallazgo que suele asignársele a Abraham Pais.

En 1952 le invitaron al Instituto de Estudios Avanzados. Allí se encontró un plantel de jóvenes brillantes. "Uno por uno parecían mucho más avezados que yo. No conseguí lo que pretendía y sufrí una depresión nerviosa." Así me consolaba, décadas más tarde, en mis apuros posdoctorales. En 1957, después de trasladarse a Chicago, propuso una nueva partícula y se enfrentó al ridículo. (Richard Feynman gritó "¡Y un jamón!" en medio de la conferencia. El omega fue descubierto al año siguiente en un acelerador.) J. Robert Schrieffer habló por entonces sobre la teoría de la superconductividad que había acabado de bosquejar junto con John Bardeen y Leon N. Cooper. La conferencia le dejó preocupado: el fluido superconductor no conserva el número de partículas, lo que viola una simetría esencial de la naturaleza. Le llevó dos años resolver el enigma.

Imaginemos un perro ante dos escudillas llenas de comida igualmente apetitosas. Si los cuencos son idénticos, se presenta una simetría entre dos cosas iguales. Pero el perro escoge arbitrariamente uno de los dos. Incapaz de aceptar que la simetría se perdiera del todo, Nambu descubrió que el perro no puede decidirse y cambia de un cuenco al otro. Por las leyes de la mecánica cuántica, la oscilación nace en forma de una nueva partícula, un bosón.

Si todos tenemos un solo ojo en la mente, él tiene, por lo menos, dos, que le proporcionan una visión estereoscópica de los sistemas físicos

Nambu señala que otros, como Philip W. Anderson y Gerard Rickayzen, también vieron que un superconductor debería tener una partícula así. Fue Nambu, sin embargo, quien detalló las circunstancias y la importancia de su nacimiento y se dio cuenta de que el pion, de la misma manera, nace de una situación similar (rompiendo la simetría quiral de los quarks, que es la simetría entre izquierda y derecha). Mientras buscaba más casos de la misma ralea en la naturaleza, Nambu distribuyó, antes de publicarla, una separata con sus hallazgos.

Jeffrey Goldstone, que realizaba una estancia posdoctoral en el CERN, vio en seguida el alcance de su trabajo y no tardó en publicar una demostración más simple, señalando que el resultado era general. A partir de entonces la nueva partícula pasó a llamarse bosón de Goldstone. (El mismo Goldstone comenta que "cuando menos, debería llamarse bosón de Nambu-Goldstone"). Cuando Nambu finalmente publicó sus cálculos en 1960, su artículo mostraba también cómo la partícula, inicialmente sin masa, se mezcla con el campo magnético de un superconductor y adquiere masa. Anderson, Peter Higgs y otros reconocieron en ello un fenómeno general, más tarde denominado mecanismo de Higgs en el modelo estándar de la física de partículas.

Nambu abordó luego la dinámica de los quarks. En su opinión, se mantenían juntos por la acción de gluones que transportaban de un lado a otro un número cuántico de color. Dice Gell-Mann que "él hizo eso en 1965, cuando los demás andábamos distraídos por ahí". (Nambu, empero, creía que los quarks eran observables y les asignó cargas eléctricas enteras, un error que Gell-Mann y otros se encargaron de corregir.) En 1970, inspeccionando una compleja fórmula matemática de interacción entre partículas, Nambu vio que describía cuerdas. En los años ochenta su "acción de las cuerdas" se convirtió en la espina dorsal de la teoría de cuerdas.

"Posee una increíble capacidad de presentar las cosas gráficamente", dice Peter G. O. Freund. Mientras trabajaba con Nambu, me di cuenta de que consideraba los problemas desde diferentes puntos de vista, pero simultáneamente. Si todos tenemos un solo ojo en la mente, él tiene, por lo menos, dos, que le proporcionan una visión estereoscópica de los sistemas físicos. Donde cualquier otro vería sólo una nube de puntos plana y sin sentido, él percibe formas vívidas, tridimensionales.

Pierre M. Ramond observa que las tendencias de la física de partículas se insinuaron en los artículos de Nambu, agazapadas en las notas a pie de página.

En la actualidad, Nambu se pregunta cómo pueden adquirir los quarks sus diferentes masas. Sugiere que puede deberse a un accidente histórico, como que los quarks nacieran en etapas diferentes del universo primitivo. Sus pensamientos se vuelven también hacia la biología y hacia un viejo tópico de infausto recuerdo, la entropía. Nambu calcula que las partículas del tamaño de los virus, si se colocan en un recipiente en forma de cucurucho, parecen violar la gravedad y la entropía. Quizás esto esconda una pista de por qué las formas de vida desafían la entropía y se vuelven cada vez más organizadas. ¿Una profecía o una quijotada? Quizá lo sepamos dentro de diez años.

Ciencia y sociedad

Genisteas

Polen y cromosomas

Las genisteas pertenecen a la familia de las leguminosas (*Leguminosae*), donde se incluyen, entre otras, especies productoras de legumbres (judías, guisantes, garbanzos, lentejas) y forrajeras (alfalfa, trébol subterráneo). Las genisteas forman un grupo de características morfológicas distintivas: son pequeños árboles, arbustos o matas, espinosos o no, que viven largos años; presentan hojas pequeñas, trifoliadas, unifoliadas, o en casos extremos reducidas a unas pequeñas estructuras espinescentes o escamosas en la base de las ramas; los sépalos de la flor están soldados en la base, formando un cáliz bilabiado, con un labio inferior provisto de tres dientes y uno superior con dos dientes; los filamentos de los estambres también se sueldan formando un tubo, dentro del cual está el ovario. Estos, y otros rasgos morfológicos que comparten, permiten pensar que todas las genisteas derivan de un antepasado común.

La caracterización de las distintas especies y géneros de las genisteas desde el punto de vista morfológico es bastante compleja. De hecho, la delimitación de algunos géneros todavía es motivo de controversia por la evolución reticulada de caracteres que se observa. Esto puede deberse a que su diversificación se realizó de forma "explosiva" (rápida en términos evolutivos) y unida a una importante radiación adaptativa, relacionada con factores ecológicos e importantes cambios en la dotación cromosómica. La diversificación de los hábitats y las fluctuaciones climáticas de fines del Terciario y del Cuaternario parecen haber favorecido y acelerado esta diferenciación, que condujo a la especiación.

En la cuenca mediterránea, principal centro de diversificación del grupo, es donde muestra hoy mayor diversidad, aunque se extiende hacia el norte de Europa, Oriente Medio y, algunos géneros, hacia Africa. En la península Ibérica hay gran número de géneros y especies, algunos de ellos endémicos de áreas muy restringidas o de medios ecológicos muy particulares. Además, desde el punto de vista del paisaje y de la vegetación, son especies dominantes de numerosas comunidades de matorrales, especialmente en las zonas de alta montaña. Pertenecen a este grupo los tojos (*Ulex*), aulagas (*Genista*), codesos (*Adenocarpus*), retamas (*Retama*), escobones y piornos (*Cytisus*), que forman matorrales típicos de nuestra geografía. Ejemplo de éstos son los piornales de las partes superiores del Sistema Central, los tojares gallegos, los de la Cordillera Cantábrica y del País Vasco, los aulagares de Levante, Andalucía y Extremadura, etc. El color amarillo vivo de sus flores caracteriza el paisaje de amplias zonas de la Península, en épocas del año en que otros vegetales pasan su período de reposo y carecen de flores.

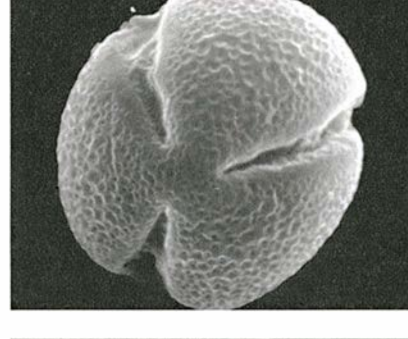
Todos estos factores nos han llevado a considerar que las genisteas son un grupo muy adecuado, desde el punto de vista biosistemático y evolutivo, para la realización de estudios de diversificación, especiación y evolución.

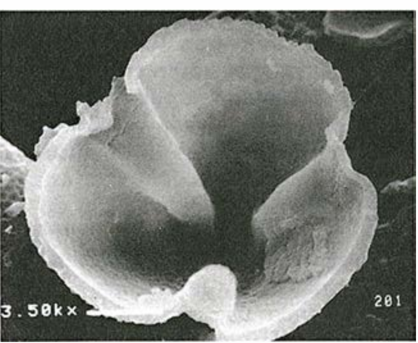
En lo concerniente a la cariología, las genisteas destacan por la notable diversidad de números cromosómicos. Existen desde especies con 18 cromosomas hasta con 144 cromosomas; dentro de un mismo género encontramos grandes variaciones de una especie a otra. Tal diversidad cromosómica se debe fundamentalmente a dos procesos: la poliploidía y la aneuploidía.

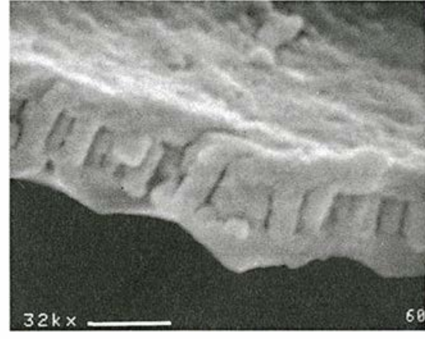
En la situación básica, las células vegetativas presentan dos juegos de cromosomas, cada uno de ellos procedente de uno de los parentales. En estos casos se habla de individuos diploides (2*x*). La poliploidía consiste en la multiplicación del número de juegos cromosómicos completos presentes en la célula. Si hay más juegos, se habla de triploides (3*x*), tetraploides (4*x*), pentaploides (5*x*), etc., según posean 3, 4, 5, ..., juegos completos. La aneuploidía supone la variación en el número de cromosomas de la célula, por ganancia o pérdida de cromosomas individuales, y se asocia en muchas ocasiones a profundos reajustes cromosómicos estructurales.

En las genisteas se han encontrado









Aspecto de las flores del tojo (género Ulex*) y grano de polen al microscopio electrónico de barrido* (arriba). Abajo: *Sección transversal de un grano de polen y detalle de la pared polínica mostrando el infratectum formado por columelas originadas por apilamiento de gránulos*

diploides, tetraploides, hexaploides e incluso niveles de ploidía más altos Se ha dado también en ellas el fenómeno de la aneuploidía, que ha contribuido a la diversificación de algunos géneros. Ejemplo de géneros que han experimentado, en el curso de la evolución, una profunda poliploidía son *Ulex* (con especies con 32, 64 o 96 cromosomas) y *Stauracanthus* (con 48, 96 o 144 cromosomas). Por su parte, *Genista* es un género donde se ha producido aneuploidía, y sus especies presentan toda una serie de números cromosómicos (18, 22, 24, 26, 30, 32, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 72, 84, 88, 96, 120).

Contrastando con la gran diversidad morfológica y cariológica de las genisteas, la morfología de los granos de polen es bastante homogénea. El polen es esferoidal o elipsoidal, con tres aperturas meridionales alargadas (colpos) y sobre ellas, en la zona ecuatorial interna, tres pequeñas aperturas irregulares, mal delimitadas (endoaperturas difusas). La ornamentación de la pared varía ligeramente, puede presentar desde pequeñas perforaciones a retículos, que se asemejan a las celdas de una colmena.

La homogeneidad encontrada en la morfología y ornamentación del grano de polen no permitía suponer la existencia de variabilidad en la estructura de la pared polínica. Mediante la realización de cortes transversales de los granos de polen con microtomo de congelación se ha observado la sección de la pared en algunos géneros de genisteas. Esta técnica, que pone de manifiesto la existencia de una importante variabilidad en la pared polínica, permite establecer cuatro tipos estructurales diferentes. En el primer tipo, el más simple, la pared es compacta y el infratectum (la capa intermedia de la pared externa) está poco desarrollado y constituido por gránulos. En el segundo tipo, algo más elaborado, el infratectum se compone de gránulos y columelas. En el tercero, el infratectum está formado por columelas bien desarrolladas, originadas por apilamiento de gránulos radialmente ordenados. En el último tipo, todas las capas de la pared externa son de textura granular.

En los géneros estudiados hasta el momento, y de los que disponíamos de datos cariológicos propios, hemos podido establecer una buena correlación entre los niveles de ploidía y el tipo estructural de la pared polínica. Así, en los géneros *Ulex* y *Stauracanthus* los taxones diploides presentan pared polínica de tipo I, la mayoría de los tetraploides de tipo II y los hexaploides de tipo III. En estos géneros, en los que la poliploidía ha sido un factor dominante en su diversificación, la correlación entre el grado de complejidad de la estructura de la pared polínica y el número cromosómico es muy alta. Fenómeno que se halla en consonancia con la correlación existente entre el tamaño de flores y semillas con el número cromosómico que, aunque no es perfecta, se reconoce como tendencia marcada.

En *Genista* también se observa la misma tendencia. Sin embargo, en este género a los fenómenos de poliploidía se superponen las variaciones aneuploides en el número de cromosomas, lo que complica los patrones evolutivos. Así en *Genista*, existe un cuarto tipo de estructura polínica que no se da en *Ulex* ni en *Stauracanthus.* Nuestro objetivo es estudiar en detalle otros géneros de genisteas y establecer correlaciones entre variaciones cromosómicas, polínicas, morfológicas y ecológicas, para lograr una visión de conjunto de cómo se ha producido la diversificación en este grupo.

PALOMA CUBAS Y C. PARDO
Dpto. Biología Vegetal II
Facultad de Farmacia
Universidad Complutense, Madrid

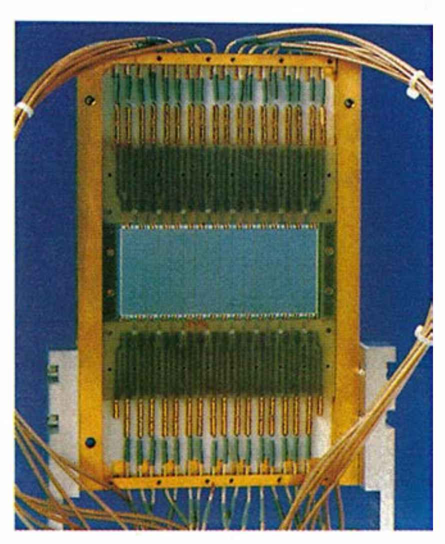
Tabla periódica

El elemento 110

A las 16:39 horas del 9 de noviembre de 1994, en el laboratorio de la Sociedad para la Investigación en Iones Pesados (GSI) de Darmstadt, un grupo internacional de investigadores obtuvo un resultado notable: la producción y la confirmación de haber descubierto un nuevo elemento químico, al que le corresponde el número de orden 110 en la tabla periódica. Se trata del más pesado de los elementos conocidos.

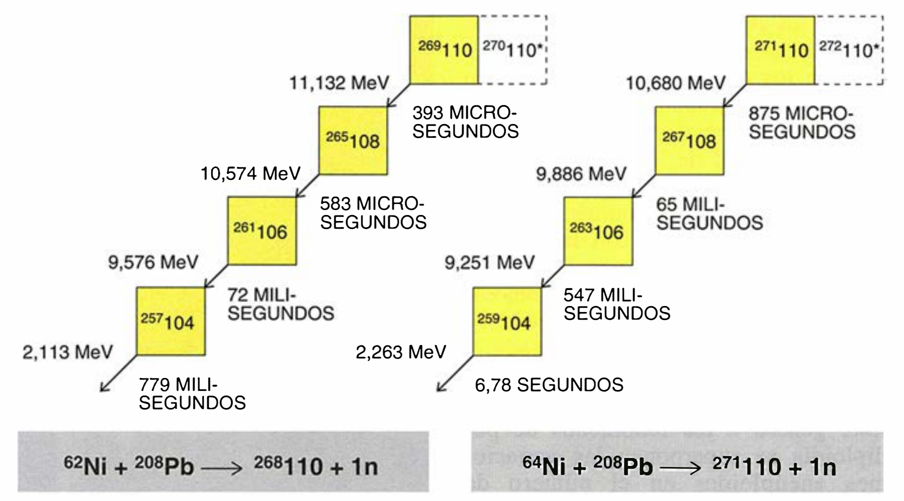
Durante los últimos diez años, varios equipos de físicos de diversas instituciones de todo el mundo habían trabajado intensamente, aunque sin éxito, en su búsqueda. El éxito se logró sólo tras una mejora substancial de las técnicas de aceleración y de detección. El equipo capitaneado por Sigurd Hofmann dedicó cinco años a la preparación del experimento, que al final se vieron recompensados con la producción de unos cuantos átomos de dicho elemento.

Químicamente el nuevo elemento artificial, que contiene 110 protones en su núcleo, pertenece al grupo del níquel, paladio y platino (de números atómicos 28, 46 y 78). Sin embargo, como sea que a los pocos segundos de su producción se transforma en isótopos de elementos más ligeros por emisión de partículas alfa —núcleos de helio 4— resulta que el elemento reviste escaso interés químico. Sí lo encierra, por contra, en física nuclear. En efecto, puede ayudar a resolver, entre otras cuestiones, la relativa a las condiciones de las que depende la estabilidad de los núcleos atómicos extraordinariamente pesados, cuya respuesta aún se desconoce. Por otro lado, los físicos suponen que, para números atómicos aún superiores, existe un dominio —a menudo denominado isla de estabilidad— en el que la vida media de los átomos podría ser mucho mayor que la de los últimos elementos de la tabla periódica hasta ahora conocidos.



1. Con este detector de silicio se obtuvo el elemento 110. La parte interior, en la que aparecen 16 líneas verticales, tiene 35 mm de altura y 80 mm de ancho. Cuando en el blanco de plomo del detector queda aprisionado uno de los núcleos ligados producidos, se pueden determinar con precisión tanto la posición y la energía del núcleo como las de las partículas alfa emitidas a continuación. El tiempo de resolución es de un microsegundo. La temperatura de trabajo del detector es de –10 grados centígrados, al objeto de reducir el ruido térmico

El descubrimiento lo lograron 13 investigadores utilizando el acelerador lineal de iones pesados UNILAC (acrónimo de acelerador lineal universal) del GSI. Con el acelerador se llevan núcleos de níquel a energías muy altas, y luego se disparan sobre un blanco fijo, en este caso una lámina de átomos de plomo 208. Esto,



2. Cadenas de desintegración de los dos isótopos del nuevo elemento 110. Primero se producen los núcleos ligados mediante la fusión de núcleos de níquel y plomo; éstos, por regla general, se separan de inmediato. Sólo si la energía de excitación se reduce enseguida mediante la emisión de un neutrón se puede confirmar su existencia en el detector. Entonces, el nuevo elemento se va transformando en elementos más ligeros por emisión sucesiva de partículas alfa. A partir de las energías de desintegración distintas, medidas en millones de electronvolts (megaelectronvolts o MeV), que se observan pueden identificarse dos isótopos del elemento: el $^{269}110$ y el $^{271}110$. En la tabla se dan, además, los tiempos de correlación entre cada dos desintegraciones sucesivas, que no deben confundirse con los tiempos de vida medios

que parece sencillo, debe acometerse con una precisión extraordinaria, ya que sólo para un valor de la energía muy concreto pueden los proyectiles fusionarse en un estado ligado con los núcleos de plomo del blanco. La mayoría de los núcleos de níquel atraviesan la lámina de plomo, en tanto que sólo uno de cada 10^{18} consigue unirse con un átomo de plomo, lo que puede confirmarse sin ambigüedades.

Los núcleos ligados que se producen escapan del folio gracias a la magnitud del impulso que llevaba el proyectil. Primero se seleccionan por medio de un filtro de velocidades y luego se les atrapa en un sistema detector, donde se les puede identificar a través de las reacciones de desintegración a que dan lugar y a partir de las energías de las partículas alfa que emiten (*figura 1*).

En un experimento de dos semanas de duración los investigadores del GSI emplearon átomos de níquel 62 como proyectiles. Con ellos les fue posible observar en total cuatro átomos del nuevo isótopo $^{269}110$, cuyo núcleo además de 110 protones contiene 159 neutrones. Con su número másico de 269, este isótopo es 269 veces más pesado que el átomo de hidrógeno. Un segundo isótopo del nuevo elemento, de número másico 271, se produjo en un segundo experimento que tuvo lugar el 23 de noviembre y en el que se utilizaron como proyectiles átomos de níquel 64. En ese experimento se detectaron siete de los nuevos átomos (*figura 2*).

Los dos isótopos del nuevo elemento tienen tiempos de vida media de 170 microsegundos y 1,4 milisegundos, respectivamente. Las correspondientes secciones eficaces de producción (que es una medida de la probabilidad con la que pueden producirse los isótopos artificiales mediante la reacción descrita) son de $3{,}5 \times 10^{-36}$ y de 15×10^{-36} centímetros cuadrados.

El elemento 110 es el cuarto descubierto en el GSI. Entre los años 1981 y 1984 se produjeron e identificaron allí los elementos 107, 108 y 109, a los que posteriormente se les adjudicó el nombre de nielsbohro, hassio y meitnerio. Con la síntesis y confirmación de la existencia de este nuevo elemento 110 aún más pesado, los investigadores del GSI consiguieron otro éxito en este campo, lo que allana el camino hacia el posible descubrimiento de nuevos elementos de valores másicos todavía superiores, que ampliarán el sistema periódico. De hecho, los trabajos para la producción del elemento 111 ya se han iniciado.

PETER ARMBRUSTER
Laboratorio de la Sociedad para la Investigación en Iones Pesados de Darmstadt

Activación génica

Y factores de transcripción

Las células de los organismos superiores reaccionan de forma diversa según los estímulos que reciben. Unos estímulos vienen de fuera de la célula y otros proceden del interior de la misma. En el primer caso hablamos de estímulos externos o ambientales, de los que son ejemplos las hormonas y factores de crecimiento. En el segundo caso nos hallamos ante estímulos internos, que instan, entre otros, procesos de desarrollo y diferenciación celular.

La adaptación de la célula ante la nueva situación implica la modulación —esto es, la activación o inactivación— de los genes relacionados con la respuesta desencadenada. Esta regulación diferencial de genes en respuesta a los estímulos se produce, en la mayoría de los casos, a través del control de la transcripción. Llámase transcripción al proceso en virtud del cual la información contenida en la estructura del ADN se transmite hacia productos de ARN.

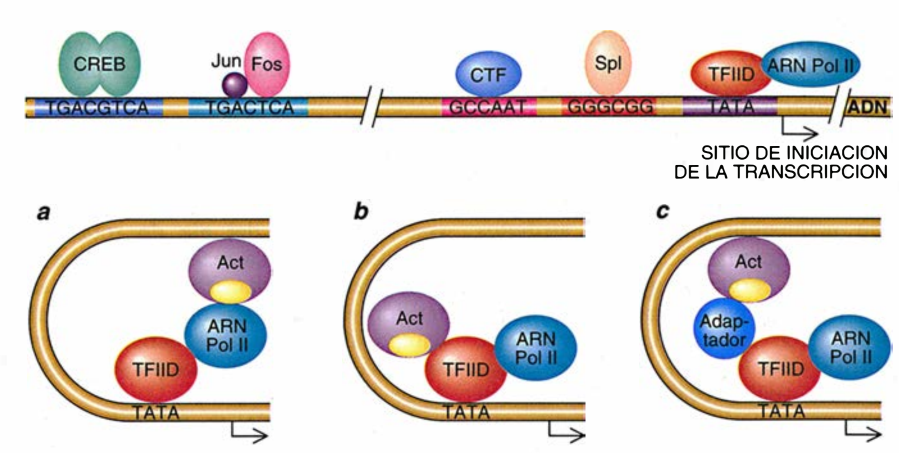
Dentro de cada molécula de ADN existe un punto donde se inicia la transcripción; se realiza ésta mediante la activación de la enzima ARN polimerasa II (ARN pol II). Para que un gen se active, se necesita la interacción entre factores de transcripción y secuencias reguladoras del ADN. (Los factores de transcripción son proteínas nucleares.) Las secuencias reguladoras se sitúan delante mismo del sitio de iniciación de la transcripción, en el segmento promotor. Aunque no siempre se localizan en las proximidades del sitio de iniciación: las llamadas secuencias multiplicadoras ("amplificadoras") quedan a gran distancia.

Cada gen tiene una combinación particular de elementos de respuesta positivos y negativos, que hacen que su expresión esté controlada de una forma muy compleja. La transcripción de la mayoría de los genes requiere la presencia de un conjunto de proteínas necesarias para dirigir la ARN pol II hacia el sitio de iniciación correcto. Estas proteínas son factores de transcripción auxiliares, que se asocian y se disocian en el momento de iniciación, formando el complejo transcripcional. La eficacia relativa de formación de este complejo y su estabilidad depende de la presencia o ausencia de la caja TATA (secuencia que debe su nombre a los nucleótidos que la integran). El principal componente del

complejo transcripcional es el factor de transcripción TFIID que se une a la caja TATA.

La activación de la transcripción requiere, por un lado, que los factores de transcripción se unan de forma específica a las secuencias reguladoras en el ADN y, por otro, que interaccionen, mediante uniones proteína-proteína, con el complejo transcripcional.

Existe una gran diversidad de factores de transcripción. Pero podemos clasificarlos, según las características de sus dominios de unión al ADN, en tres familias principales: homeodominios, dedos de cinc y cremalleras de leucina. Los homeodominios presentan, como rasgo distintivo, una región de aminoácidos que forman una estructura de tres hélices alfa con un núcleo hidrofóbico. Es la tercera hélice la que establece la mayoría de los contactos con el ADN. Los dedos de cinc contienen motivos de unión a metales, y necesitan cinc o cadmio para unirse como monómeros o dímeros al ADN. Por último, las cremalleras de leucina poseen un motivo rico en leucinas que forman una especie de "cremallera" a través de la cual se produce la dimerización necesaria para unirse al ADN.



Esquema de un promotor eucariota típico. En el panel superior se ilustra la distribución hipotética de los elementos nucleotídicos de respuesta y de los factores de transcripción que se unen a ellos. En primer lugar, la caja TATA y el sitio de iniciación de la transcripción; en segundo lugar, los elementos situados por delante mismo de aquéllos y que sirven de reconocimiento de proteínas de la maquinaria básica transcripcional; en tercer lugar, otros elementos intercalados entre los anteriores, activadores de genes en tejidos o en respuesta a determinados estímulos; y por último, elementos más alejados que aumentan la actividad de ciertos genes. La combinación de todos estos elementos confiere a cada gen un programa de transcripción específico. En la figura aparecen factores de transcripción al azar: CREB (de respuesta a AMPc), los oncogenes fos/jun (de respuesta a promotores tumorales), CTF y Sp1 (factores constitutivos). En el panel inferior se representan posibles mecanismos de activación transcripcional por interacción directa del dominio de activación (Act) de un factor de transcripción con (a) *la ARN pol II,* (b) *el factor TFIID,* (c) *una proteína adaptadora entre el activador y el factor TFIID. Los factores de transcripción establecen mutuo contacto entre sí y con las proteínas de la maquinaria transcripcional gracias a la estructura de plegamiento del ADN*

Además del reconocimiento específico del ADN, para la activación de la transcripción se requiere la presencia de los dominios de transactivación, que se dividen, según la abundancia de aminoácidos que los constituyen, en acídicos, ricos en glutaminas y ricos en prolinas.

¿En qué consiste el mecanismo de activación de la transcripción? Un mecanismo obvio es la interacción directa entre los dominios de transactivación de los factores de transcripción y la enzima ARN pol II, de manera que se aumente su actividad. La subunidad mayor de la ARN pol II contiene múltiples copias de una secuencia que ha persistido en el curso de la evolución y que es esencial para ejercer su unión. Este motivo, rico en grupos hidroxilo y sin residuos acídicos dotados de carga negativa, podría interaccionar directamente con los dominios acídicos o ricos en glutaminas de los factores de transcripción.

Cabe un segundo mecanismo: que un factor interactúe con otras proteínas de la maquinaria transcripcional; se promovería así el ensamblaje del complejo de transcripción y se estabilizaría la unión entre sus componentes o la de éstos al ADN. El mejor candidato para ello es TFIID, ya que este factor se requiere para la transcripción de los genes con o sin caja TATA.

E incluso sería posible un tercer tipo de interacción: que una proteína adaptadora actuase de puente entre un factor de transcripción y el TFIID, o algún otro componente de la maquinaria transcripcional.

Los factores de transcripción no se limitan a cumplir un papel en la expresión génica constitutiva; intervienen también en la inducción de ciertos genes en respuesta a estímulos concretos. Existen para ello mecanismos mucho más sutiles de regulación de la activación génica en respuesta a dichos estímulos o en distintos tipos celulares; esos mecanismos dependen de otros que controlan la síntesis o la actividad de los diversos factores de transcripción involucrados en las respuestas. Se trata de determinar qué activa a los activadores.

Dos son los mecanismos básicos por los que se puede regular la acción de los factores de transcripción: controlando la síntesis de la proteína, de manera que sólo se fabrique cuando se necesite, o regulando la actividad del factor ya sintetizado, cuando ello se requiera.

El control de regulación génica resulta imprescindible para los procesos normales del nuestro organismo. No debe sorprendernos que algunos aspectos del complejo programa de crecimiento y diferenciación celular puedan estar alterados, ni que un defecto en el proceso de transcripción derive en enfermedad. Por ejemplo, la ausencia del factor de transcripción específico y necesario para transcribir los genes del complejo mayor de histocompatibilidad de la clase II determina que estos genes no se transcriban. Ello origina una de las inmunodeficiencias congénitas humanas más severas. Asimismo, la expresión incorrecta del factor de transcripción específico de hipófisis que transcribe el gen de hormona de crecimiento, causa problemas de deficiencia de esta hormona y, por tanto, problemas de enanismo congénitos.

Muchos oncogenes y supresores tumorales son factores de transcripción. Por consiguiente, cualquier alteración en estos factores atenta contra la regulación del proceso de control del crecimiento celular. Estos son sólo algunos ejemplos de la importancia que tienen los factores de transcripción en el proceso de control de la activación génica.

PILAR SANTISTEBAN
Instituto de Investigaciones Biomédicas
(C.S.I.C.), Madrid

Galaxias

La dinamo perdida

Planetas, estrellas y galaxias giran y tienen campo magnético. Durante muchos años los astrofísicos han mantenido que ambos atributos están relacionados: la rotación de partículas cargadas genera los campos magnéticos mediante un proceso de dinamo. Un coro cada vez más nutrido de teóricos sostiene ahora que el usual mecanismo de dinamo falla en el Sol y la Vía Láctea —y por extensión en todas las estrellas y galaxias—. "Harían falta 10^{26} años para crear el campo magnético de la Vía Láctea," señala Russell M. Kulsrud. Pero la galaxia lleva ahí no más de 10^{10} años.

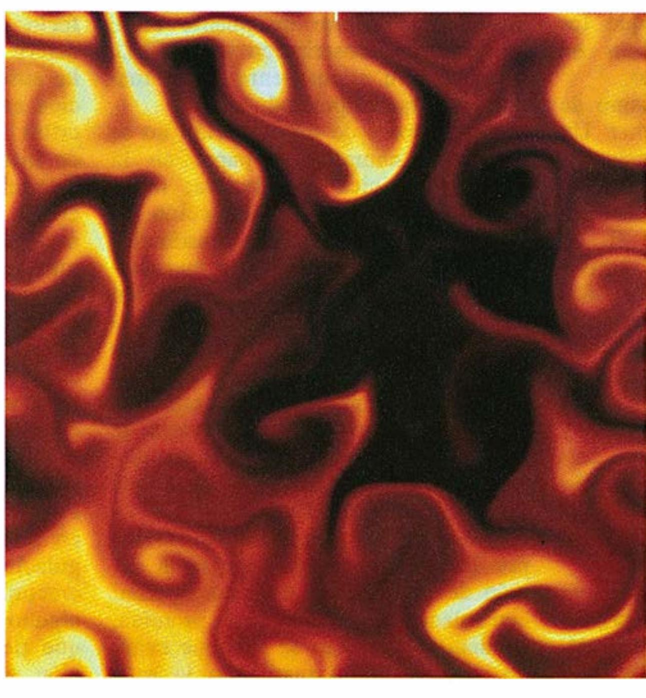
No son nuevos los apuros de las dinamos. Les vienen del tortuoso comportamiento de las líneas de campo magnético cuando están inmersas en un fluido muy conductor, como el de una estrella o el del medio interestelar. Las partículas cargadas giran alrededor de la línea, y la atrapan y fuerzan a compartir el movimiento del plasma. Pero en 1934 Thomas G. Cowling demostró que flujos simples y simétricos de fluido no pueden generar campos magnéticos. La maldición de este teorema antidinamo se levantó sólo en 1955, cuando Eugene N. Parker describió de qué manera podría la atmósfera caliente y ionizada del Sol amplificar un campo original pequeño.

El modelo de Parker, afinado por Max Steenbeck y otros, vino a ser el favorito de los astrofísicos. Pero ahora se vislumbra que también él está condenado, y a causa de esa misma turbulencia por la que escapó del viejo teorema antidinamo. Piénsese, por ejemplo, en cómo funciona la dinamo en una galaxia. El disco galáctico gira más despacio por los bordes exteriores. Una línea de campo que yazga a lo largo de un radio será arrastrada con el disco. Pero la línea se rezagará en el borde y acabará por ovillarse en una apretada espiral. Una sola línea pasa entonces repetidas veces por cada pequeña región de plasma, y da un campo global intenso.

Si un pequeño rizo de línea se proyecta fuera del plano de la galaxia, las fuerzas de Coriolis (las que determinan la dirección en que giran los tornados) harán que se vaya doblando en direcciones opuestas a un lado y otro del disco. Muchos de esos bucles se alinearán formando tirabuzones; se crean así campos magnéticos a lo largo del eje de rotación. Pero los bucles se resisten a doblarse y tienden a deshacerse. Para que la tensión se afloje sin que se pierda el campo axial, los rizos deben moverse unos hacia otros, romperse y reunirse en rizos mayores.

Aquí es donde se resquebraja la cosa. Las líneas del campo están atrapadas en el fluido en una medida dada por el número magnético de Reynolds. Este crece con la conductividad eléctrica del plasma y la extensión física del campo magnético. En el núcleo fundido de la Tierra, el número de Reynolds es alrededor de 100. En una estrella o galaxia, donde las distancias son enormes, números de Reynolds de 10^{10} o 10^{18}, respectivamente, aseguran que el atrapamiento es casi completo.

Los bucles pueden, sin embargo, si son muy pequeños, difundirse y recombinarse; en tal caso su número de Reynolds efectivo es bajo. Kulsrud ha mostrado que los bucles tendrían entonces que estar ovillados tan apretadamente que se apartarían de nuevo, dejarían de ovillarse y la dinamo se pararía antes de que pudiera generar un campo para toda una galaxia.



Los rizos fractales de campos magnéticos (ilustración) *y de corriente eléctrica absorben toda la energía de una dinamo astrofísica y la abocan a pararse por la fricción. Proporcionó esta simulación Fausto Cattaneo, de la Universidad de Chicago*

Samuel I. Vainshtein lleva más adelante el argumento: los bucles son fractales. Alcanzan dimensiones sumamente pequeñas, y se hacen todavía más rígidos. Estos parásitos devoran toda la energía y no contribuyen nada al campo. (Y de paso se han comido otra popular dinamo, la concebida por Vainshtein y Yakov B. Zel'dovich en 1972. En ese modelo, un rizo de campo magnético se estira, retuerce y pliega sobre sí repetidas veces, amplificando de esa forma un campo inicial pequeño.)

Philipp P. Kronberg y Richard Wielebinski han encontrado que las líneas del campo magnético de la Vía Láctea se tienden a lo largo de sus brazos espirales enrolladas tal y como las dinamos las dispondrían. Los modelos solares, sin embargo, aunque explican muy bien el ciclo de veintidós años de las manchas solares, no tuvieron esa suerte. A finales de los años ochenta los datos heliosísmicos revelaron que cerca de los polos la rotación del Sol es más lenta en las capas más profundas. Los modelos requerían que la rotación interna fuese más rápida.

Los teóricos han corrido a rescatar la dinamo. Parker conjetura que el gas en rápido movimiento de rayos cósmicos que impregna la galaxia expelería del disco burbujas magnéticas gigantes, y fuera del disco éstas se vuelven a conectar con facilidad. George B. Field se opone a los cálculos de Kulsrud; dice que las explosiones de supernovas alterarían el balance energético del campo turbulento. O, como Ellen G. Zweibel indica, las colisiones entre los iones cargados y los átomos neutros del plasma podrían contribuir a que las líneas del campo se difundieran más deprisa. Los entresijos de la dinamo del Sol quizás estén ocultos bajo la zona convectiva, por ahora fuera del alcance de los estudios sísmicos solares.

Pocas de estas propuestas se apoyan en cálculos detallados. Sólo hay otra explicación de los campos magnéticos astrofísicos: que se crearon en los primeros tiempos del universo. Sin embargo, esos campos no se extenderían más de lo que el universo lo hiciese en su momento: demasiado poco para que fueran galácticos. Además, no se conoce me-

canismo alguno que genere campos tan intensos.

La verdad es que sólo la Tierra parece poseer una dinamo sin deficiencias fatales. Se dice que su campo dipolar lo generan tornados en el núcleo fundido, si bien persisten ciertas dudas acerca de la razón por la que el campo se invierte esporádicamente.

MADHUSREE MUKERJEE

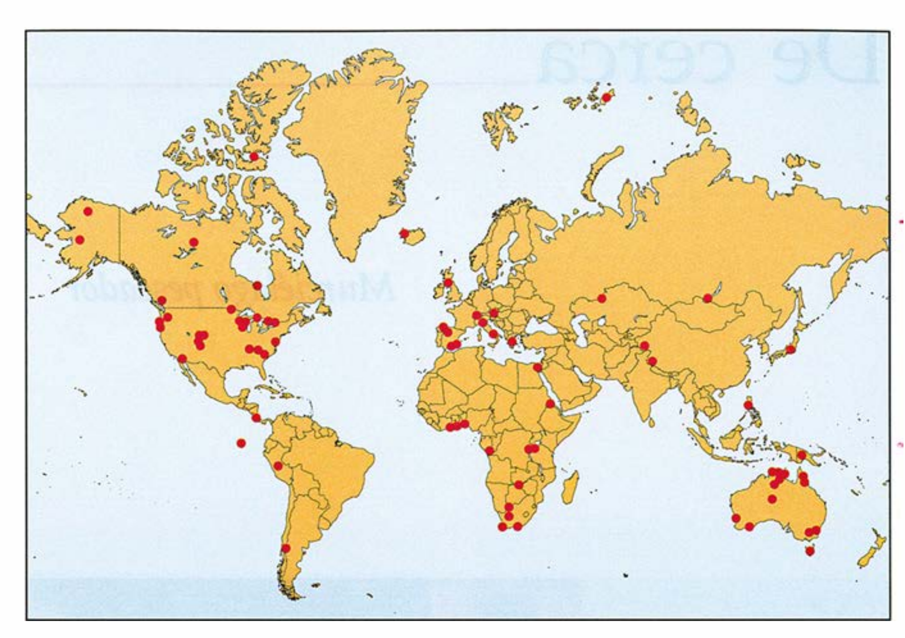
Vegetación

Patrones de diversidad

Desde el nacimiento de la ecología se vienen explorando las tendencias y causas de la biodiversidad. Se llama diversidad al número de especies, su abundancia relativa y su disposición en una determinada área. Alfred R. Wallace describía, en el siglo pasado, un aumento de la riqueza de especies desde los polos hacia las regiones tropicales. En un trabajo reciente, para explicar las tendencias de la diversidad de la vegetación y su relación con los factores ambientales, los autores han recopilado 94 colecciones de datos procedentes de los principales ecosistemas terrestres del mundo, de los que han extraído varias medidas de diversidad.

Llegamos a la conclusión de que el principal determinante de la riqueza de especies de las comunidades es la energía biológicamente disponible, que se mide por la producción primaria de los organismos fotosintetizadores y por la evapotranspiración, o retorno de agua a la atmósfera, incluida la de los organismos. Era una inferencia coherente con otras investigaciones. Pero, a diferencia de la hipótesis establecida según la cual la diversidad tiene que ver con la estabilidad climática, nosotros hemos observado que la variación de temperatura entre las estaciones del año guarda una relación positiva con la diversidad a escala global; sin embargo, en latitudes templadas la variación estacional de las precipitaciones reduce la diversidad. Por su parte, la influencia de la latitud es de orden menor, y la bondad climática (temperaturas intermedias y precipitaciones altas) no afecta directamente a la diversidad.

La diversidad diferencial de las especies vegetales presenta un gradiente latitudinal parabólico, con un máximo entre los 25° y 30° de latitud. Las zonas con elevada temperatura media anual, heterogéneas espacialmente y con bruscas diferencias estacionales de temperatura son proclives a tener comunidades vegetales constituidas por plantas muy distintas. No existe ninguna correlación entre riqueza de especies de las comunidades y su diversidad diferencial. Sí se da, por contra, una relación positiva entre la complejidad de los ecosistemas, es decir, número y longitud de los gradientes ambientales que afectan a sus organismos, y la heterogeneidad espacial, la temperatura media del invierno y la producción primaria. No hay relación entre la diversidad interna y la diversidad mosaico; sí la hay, positiva, entre la diversidad diferencial y la mosaico.



Localización de las colecciones de datos utilizadas para evaluar la diversidad de la vegetación y relacionarla con las variables ambientales del área geográfica correspondiente. De cada colección de datos se extrajeron medidas correspondientes a tres tipos de diversidad: interna, o variación de especies de una unidad ecológica, medida por el número de especies de las comunidades (diversidad α); diversidad diferencial, o distribución de las especies de los ecosistemas en sus comunidades (diversidad β), medida mediante la similitud de la composición florística entre las comunidades; diversidad mosaico o complejidad de los ecosistemas, medida mediante el modelo de Scheiner

La pauta de diversidad varía mucho de un bioma a otro. Bioma es la formación vegetal con características fisionómicas distintivas, de interés a escala global. Existen notables diferencias entre las medidas de diversidad registradas en los grandes biomas del mundo. Atendiendo a la diversidad en las comunidades vegetales se escalonan, de mayor a menor, bosques tropicales, desiertos y sabanas; en los dos últimos casos la diversidad obedece, probablemente, a la competencia por el agua. Los bosques (tropicales, templados caducifolios y templados de coníferas) son los de comunidades vegetales con mayor número de especies. Los ecosistemas más complejos son los bosques tropicales, sabanas y matorrales. Las tundras y los bosques boreales, condicionados por unas temperaturas muy frías la mayor parte del año, son los ecosistemas menos diversos.

La comparación de las medidas de diversidad entre los continentes Eurasia-Norte América y Australia-Africa reveló que la única diferencia significativa es una mayor complejidad de los ecosistemas australianos respecto a los africanos, debido al aislamiento y deriva del continente austral.

JOSÉ M. REY BENAYAS
Y SAMUEL M. SCHEINER
Universidad de Alcalá

FE DE ERRATAS

En la ilustración de la página 80 del número de abril de 1995, debe leerse:

3) $T_M = 159{,}9$ $I_M = 172$ $E = 1{,}44$ eV $s = 5{,}1 \times 10^{15}$
2) $T_M = 120{,}7$ $I_M = 183$ $E = 1{,}27$ eV $s = 1{,}7 \times 10^{16}$

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Murciélago pescador



Los murciélagos no andan con remilgos en su dieta alimentaria. Lo mismo viven de insectos que de fruta o polen. Por eso llama la atención el murciélago pescador (*Noctilio leporinus*), debidamente conformado para tan restrictiva especialización: tiene patas y pies muy largos, dotados de garras afiladas con las que captura principalmente peces así como crustáceos e insectos. Por la noche vuela pausado sobre el agua; gracias a su sistema de ecolocación, detecta las ondulaciones de la superficie del agua producidas por sus presas.

Se refugia donde puede. Aunque prefiere los huecos de los árboles, no desdeña grutas ni construcciones. Igual que a su pariente de menor tamaño *Noctilio albiventris*, lo encontramos desde el centro de México hasta el norte de Argentina. Ocupa una amplia variedad de ecosistemas, en selvas y sabanas, en plantaciones y ambientes litorales; en estos últimos pesca a veces en compañía de los pelícanos.

Tuvimos la suerte de coincidir, en la selva lacandona de México, con un especialista azteca en quirópteros. Trabajaba sobre el murciélago pescador y mantenía un ejemplar en una zona experimental. Pescamos, en el arroyo cercano, unos ciprínidos pequeños y probamos a darle uno de ellos a ver qué sucedía. Con gran sorpresa por nuestra parte comenzó de inmediato a devorarlo, sin apenas masticarlo. Sólo nos dejó sacarle dos fotografías.



Bases genéticas del cáncer

La acumulación de defectos genéticos puede hacer que las células normales se vuelvan cancerosas y que éstas adquieran mayor agresividad

Webster K. Cavenee y Raymond L. White

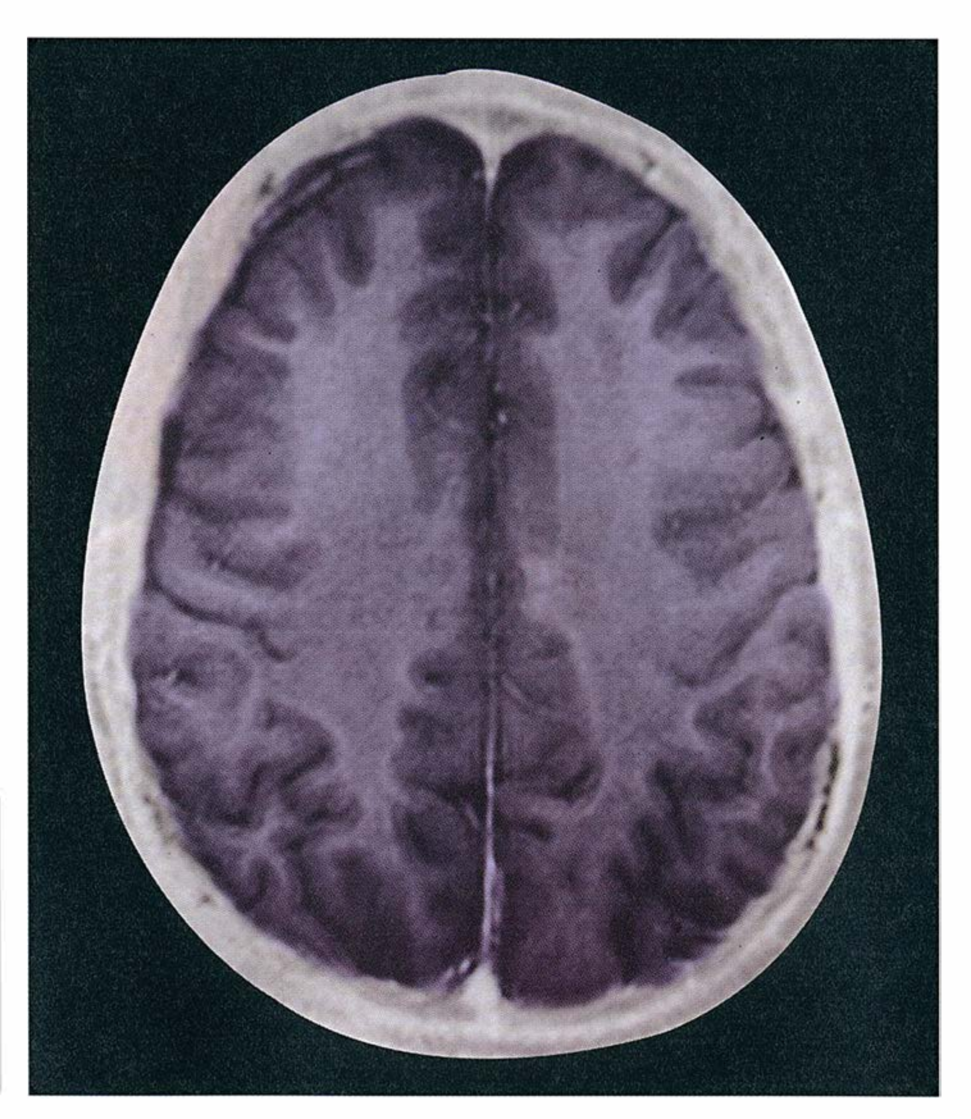
Quienes padecen cáncer tienen la sensación de que en sus cuerpos ha entrado una fuerza extraña. Falsa impresión. El mal se origina en nuestros propio tejidos. De hecho, todo parece indicar que el cáncer puede derivar de una sola célula, drásticamente alterada en su patrimonio genético.

La célula sana presenta una morfología definida y encaja a la perfección en el entorno de células que la rodean. Responde a señales ambientales y rinde células hijas sólo cuando el balance de señales estimuladoras e inhibidoras procedentes del exterior favorece la división celular. Pero el proceso de división, o crecimiento, está sometido al riesgo permanente de mutaciones genéticas: cambios aleatorios que alteran los circuitos reguladores de una célula. Una sola mutación puede hacer que la célula dañada, de apariencia normal, sea menos receptiva a los mensajes externos y sufra un proceso de división no previsto.

Con el tiempo, la acumulación de daños genéticos puede hacer que una célula hija se vuelva sorda a los mensajes exteriores y manifieste síntomas malignos: pierde su forma y límites característicos, deja de responder a señales inhibidoras del crecimiento y adquiere la propiedad de replicarse sin tasa. La masa resultante acaba dañando los tejidos sanos de su alrededor. Peor todavía. Puede invadir las barreras que separan a unos órganos de otros y reproducirse, estableciendo nuevas colonias en sitios distantes.

A lo largo de los últimos 20 años se han ido identificando genes que intervienen en esta progresión de la normalidad al cáncer. Las investigaciones en curso confirman y amplían las propuestas iniciales de que el cáncer se desarrolla, sobre todo, porque las células sufren lesiones irreversibles en ciertos genes. Pero también están proporcionando las bases para mejorar los diagnósticos y las terapias.

Lo que hoy sabemos sobre el desarrollo de los tumores es fruto de la convergencia de varias líneas de investigación, la más antigua de las cuales todavía se basa en la cuidadosa observación de las células al microscopio. En 1914, Theodor Boveri con-



WEBSTER K. CAVENEE y RAYMOND L. WHITE iniciaron, hace 15 años, una larga colaboración sobre la investigación del cáncer. Cavenee, director del Instituto Ludwig de Investigación Oncológica en San Diego, da clases en la facultad de medicina de la Universidad de California. White, que está en la Universidad de Utah desde el año 1980, dirige el Instituto Huntsman del Cáncer.

cluyó de tales observaciones que las células malignas portaban cromosomas anormales y que cualquier hecho que originase ese tipo de aberraciones podría causar el cáncer.

Las observaciones al microsopio ganaron muchísimo en especificidad a partir de 1970, cuando las nuevas técnicas de tinción y mejores equipos permitieron distinguir cada una de las 23 parejas de cromosomas, entre todos los cuales reúnen los genes que constituyen el patrimonio hereditario de un ser humano (las células humanas, salvo espermatocitos y ovocitos, portan dos series de cromosomas, una heredada de la madre y otra del padre). Cada cromosoma se tiñe en regiones específicas, quedando así marcado por una serie característica de bandas claras y oscuras.

Comparando los cromosomas teñidos de células normales con los procedentes de tumores, se observaron muchos signos diferentes de trastornos genéticos en los cánceres. Los cromosomas extraídos de tumores solían estar rotos, con algunas de sus piezas soldadas a otros cromosomas. De algunos cromosomas había muchas copias, en vez de las dos normales. Cromosomas enteros, o a veces segmentos internos, parecían haber desaparecido por completo. Pero hubo que esperar a los años ochenta para disponer de herramientas con las que determinar si las reorganizaciones cromosómicas eran causa del cáncer o efecto de su desarrollo.

El estudio de familias en las que se da una incidencia alta de ciertos cánceres ha suministrado indicios muy diferentes del papel que desempeñan los genes. Cuando una enfermedad se manifiesta en una familia con unas pautas predecibles, suele haber detrás un defecto hereditario.

El descubrimiento de que algunos cánceres parecían ser hereditarios planteó, no obstante, cuestiones sorprendentes. Un defecto genético transmitido a un hijo a través del esperma o del óvulo debería aparecer en todas las células del cuerpo. ¿Por qué entonces las personas que heredan la enfermedad sólo suelen desarrollar uno o muy pocos cánceres, y en sitios discretos? Además, que existan cánceres hereditarios, "familiares", ¿significa necesariamente que los casos esporádicos de enfermedad (no familiares), mucho más comunes, tienen también una base genética? ¿Poseen los cánceres esporádicos un origen distinto?

En 1971, Alfred G. Knudson, Jr., propuso una hipótesis que respondía a las dos cuestiones, aunque hubo que esperar casi diez años para que sus ideas se ganaran la aceptación general. Estaba interesado en la causa del retinoblastoma, una enfermedad infantil rara, caracterizada por el desarrollo de tumores malignos en la retina antes de los seis años de vida. Observó que, a veces, la enfermedad se manifestaba en los dos ojos, aunque en la mayoría de las ocasiones sólo estaba afectado uno. Además, era frecuente encontrar parientes próximos de los niños afectados en ambos ojos con la misma enfermedad.

Un análisis estadístico que comparaba la edad de aparición de cada forma de enfermedad demostraba que el tipo bilateral solía diagnosticarse a una edad más temprana que el unilateral. También, la forma de las curvas de distribución de edades sugirió a Knudson que el retinoblastoma se originaba a partir de dos defectos celulares producidos en momentos distintos. En la enfermedad bilateral, el primer defecto era probablemente hereditario, y se encontraba en todas las células del cuerpo desde la concepción. En la enfermedad unilateral, el primer defecto se producía probablemente durante el desarrollo, o más tarde, y quizá sólo en las células de la retina. En ambos casos, sin embargo, la formación del tumor iba asociada a la producción de un segundo defecto. La teoría de los dos golpes de Knudson, como se la suele conocer, es aplicable a todos los cánceres, no sólo al retinoblastoma. A menudo, no obstante, se requieren más de dos golpes.



1. CANCER DE CEREBRO desarrollado en sólo tres meses, que es el tiempo que media entre la imagen de la izquierda, donde no se percibe, hasta que se forma un tumor que cubre parte de un hemisferio (*área azul, derecha*). El paciente, cuyo primer síntoma fue un tic incontrolable en un ojo, murió a los dos meses de realizarse la segunda imagen. Los tumores cerebrales y otros estados malignos surgen cuando se combinan varias mutaciones genéticas que liberan a las células de las restricciones normales que afectan a la proliferación, invasión y movimiento.

La necesidad de dos golpes, alteraciones, en ciertos genes explica por qué los pacientes de familias propensas al cáncer no están llenos de tumores por todo el cuerpo: la herencia de un defecto genético predispone al cáncer, pero no lo produce directamente. Hace falta un segundo evento. La intuición de Knudson, de que una misma anomalía bioquímica podía ser responsable de los casos esporádicos y familiares, también se ha confirmado. Volviendo a los setenta, sus ideas eran un apoyo para quienes pensaban que investigar las aberraciones genéticas y celulares presentes en los casos raros de cánceres familiares era una forma eficaz de aproximarse a los procesos que conducen a los estados malignos esporádicos.

Mientras unos se centraban en la genética de enfermedades familiares, otros, convencidos también de que los genes estaban en la raíz del cáncer, emprendían una aproximación muy distinta. Desde hacía muchos años se sabía que ciertos virus producen tumores en animales. Esa vinculación había estimulado la búsqueda de los genes del virus responsables del cáncer y los genes del hospedador interesados. Esos esfuerzos revelaron que los genes implicados en las enfermedades malignas eran a veces formas alteradas de genes humanos que los virus habían atrapado. Otras veces, los virus activaban genes del hospedador que permanecían habitualmente inactivos.

Las versiones normales de los genes pirateados y activados, ahora denominados proto-oncogenes, cifran proteínas implicadas en el control de la división celular. Hay muchas variedades de genes que promueven el crecimiento. Algunos cifran secuencias aminoacídicas de receptores que sobresalen de la superficie celular y a los que se unen factores de crecimiento. Cuando éstos se unen, los receptores envían una señal intracelular que finalmente determina que las células se repliquen. Otros genes cifran proteínas que permanecen en el interior de la célula y gobiernan la propagación de la señal intracelular de crecimiento. Otros distintos cifran, por último, proteínas que controlan la división celular.

El descubrimiento de que los genes víricos portaban versiones humanas introducía la fascinante posibilidad de que los cánceres humanos —incluidos los no causados por virus, que son mayoría— se originasen a partir de mutaciones que convirtiesen proto-oncogenes en formas carcinogénicas, en oncogenes. Coherentes con esta idea, los estudios indicaban que la alteración de una sola copia, o alelo, de esos proto-oncogenes bastaba para transformar (volver cancerosas) algunos tipos de células cultivadas. Inducidas por esas mutaciones dominantes, las células producen en exceso una proteína normal o fabrican una forma aberrante hiperactiva. En cualquier caso, el resultado es que en el interior de las células aumentan las señales estimuladoras, aunque no haya estímulos externos.

La investigación posterior respaldó la función de los oncogenes, amén de complicar las cosas. En 1982 y 1983, se trabajó, en Francia y Estados Unidos, sobre líneas de inquisición similares a las seguidas antes con células cultivadas, aunque con una notable diferencia. Puesto que las células normales no pueden crecer indefinidamente en una placa de cultivo, los estudios primeros se realizaron con células de roedores, capaces de dividirse durante mucho tiempo en cultivo. Para eliminar esta posible fuente de confusión en los resultados, François Cuzin, Robert A. Weinberg y H. Earl Ruley se preguntaron si bastaría un solo oncogén para transformar células normales de roedores.

Se necesitaban mutaciones en al menos dos proto-oncogenes. Eso es lo que descubrieron; comprobaron, además, que sólo ciertas combinaciones de mutaciones producían el estado maligno. De lo que se infería que, individualmente considerados, los peligrosos oncogenes no podían producir tumores por sí mismos. La atención se centró entonces en ver si los tumores humanos portaban alteraciones oncogénicas de los tipos y combinaciones que transformaban las células cultivadas.

Durante un tiempo, parecía que los oncogenes podían explicar la mayoría de los casos de cáncer, idea que se vio reforzada por el descubrimiento de más de una docena de esos genes en tumores humanos. Pero los resultados fueron, a la postre, decepcionantes. De todos los tumores humanos analizados, un 20 % portaba sólo una de las alteraciones esperadas, y ninguno tenía las parejas de alteraciones cooperativas que se observaron en células cultivadas. Además, según parecía, las mutaciones heredadas responsables de la predisposición a los cánceres familiares no eran oncogenes. Quedaba mucho camino por andar.

Por esa época sospechábamos ya de la existencia de otro tipo de genes implicados en el cáncer: los genes supresores de tumores. Como su nombre sugiere, muchos de ellos cifran proteínas que inhiben la replicación celular. A diferencia de las mutaciones que activan oncogenes, las mutaciones en esos genes, pensábamos, debían ser recesivas, ya que sólo afectarían a la función celular cuando los dos alelos estuviesen dañados o faltaran. Para comprobarlo, utilizamos unas técnicas nuevas que habíamos desarrollado con el propósito más general de seguir la herencia de genes y cromosomas a través de grandes familias.

Nuestra técnica, que implicaba el seguimiento de marcadores genéticos (segmentos identificables de ADN) en tejidos, servía para determinar si segmentos de cromosomas presentes en células normales estaban ausentes en un tumor. Por ejemplo, si en un tumor faltaba una región de un cromosoma, podríamos detectarlo comprobando la pérdida de un marcador asociado a esa región.

Diseñamos los experimentos partiendo de los resultados obtenidos por Jorge J. Yunis y Uta Francke, que denunciaban la posible implicación de un gen del cromosoma 13 en el retinoblastoma. En 1983 demostramos, con nuestras técnicas de marcadores de ADN, que en las células procedentes de retinoblastomas esporádicos y familiares faltaban grandes segmentos del cromosoma 13. A tenor de los nuevos resultados, los dos golpes propuestos por Knudson podrían consistir en la pérdida física o funcional de un alelo de un gen, seguida de la eliminación, o alteración, de su copia normal. El ADN que faltaba en el cromosoma 13, ahora denominado *RB* (retinoblastoma), fue aislado por Stephen H. Friend.

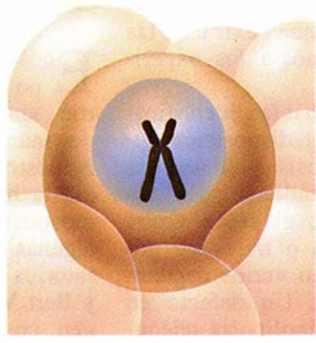
La investigación ulterior demostraría que en otros cánceres también se producen pérdidas recesivas del gen *RB*. Hoy sabemos que la pérdida o inactivación de ADN se da siempre en la génesis de todos los cánceres sólidos examinados. En los cánceres de pecho, próstata, pulmón, vejiga, páncreas y otros muchos se observa la alteración o eliminación de muchos genes supresores de tumores.

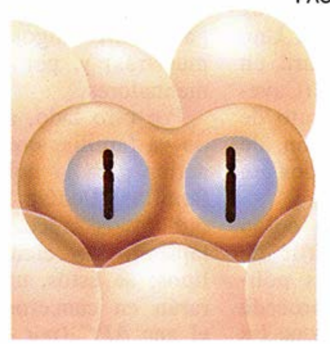
A finales de los años ochenta, por tanto, había indicios muy razonables de que las mutaciones en proto-oncogenes y genes supresores de tumores podían producir cáncer. Cabía imaginar que algunos tipos de cánceres resultasen de una combinación de tales mutaciones. Pero, ¿se producían todas las mutaciones en una misma célula? ¿Afectaban unas mutaciones a unas células y otras a células diferentes? Un modelo sobre la progresión de los tumores, propuesto en los años cin-

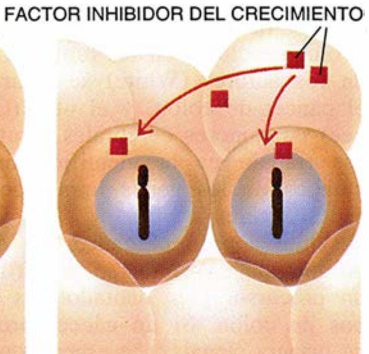
cuenta por Leslie Foulds, y ampliado en los setenta por Peter C. Nowell, sugería que la implicación de ambos tipos de mutaciones conllevaría la acumulación de éstas en una célula y en sus descendientes directos.

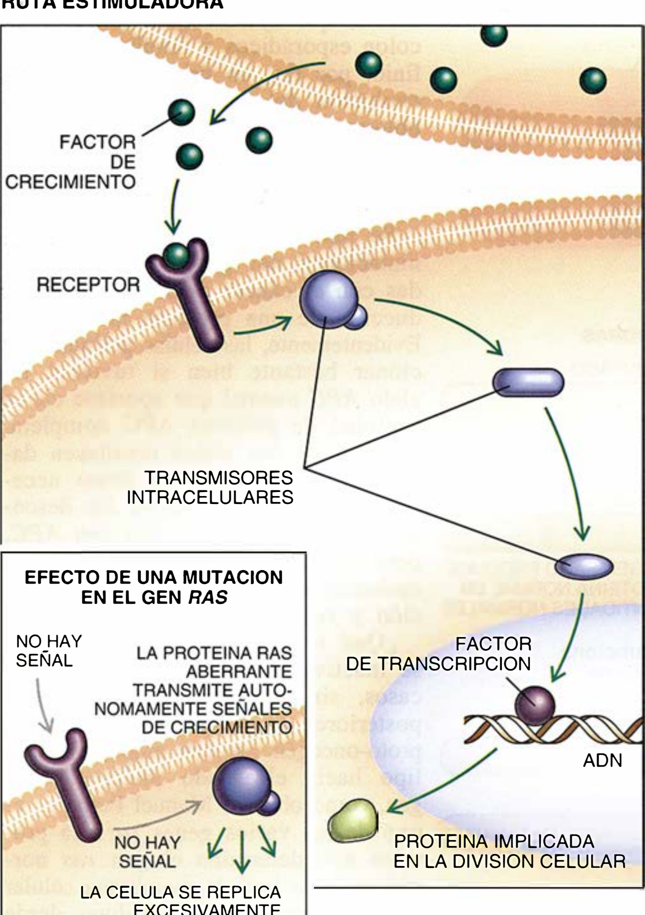
En el marco de esa hipótesis, los cánceres surgen y se tornan más peligrosos a través de un proceso de evolución clonal. Primero, una sola célula sufre una mutación genética que la hace dividirse en condiciones en las que las células normales cesan su replicación. Puesto que estas células (que se dividen de forma impropia) copian su ADN y transmiten series idénticas a sus descendientes, la siguiente generación de células porta los mismos cambios y muestran idéntico crecimiento indebido. Más tarde, una de esas células o sus descendientes sufren una mutación, que la libera de los mecanismos reguladores normales y que, probablemente, le permite invadir tejidos vecinos y entrar en el torrente sanguíneo. Esta mutación, además, se transmite a las células hijas. Mediante la reiteración del proceso, una célula termina por acumular las mutaciones

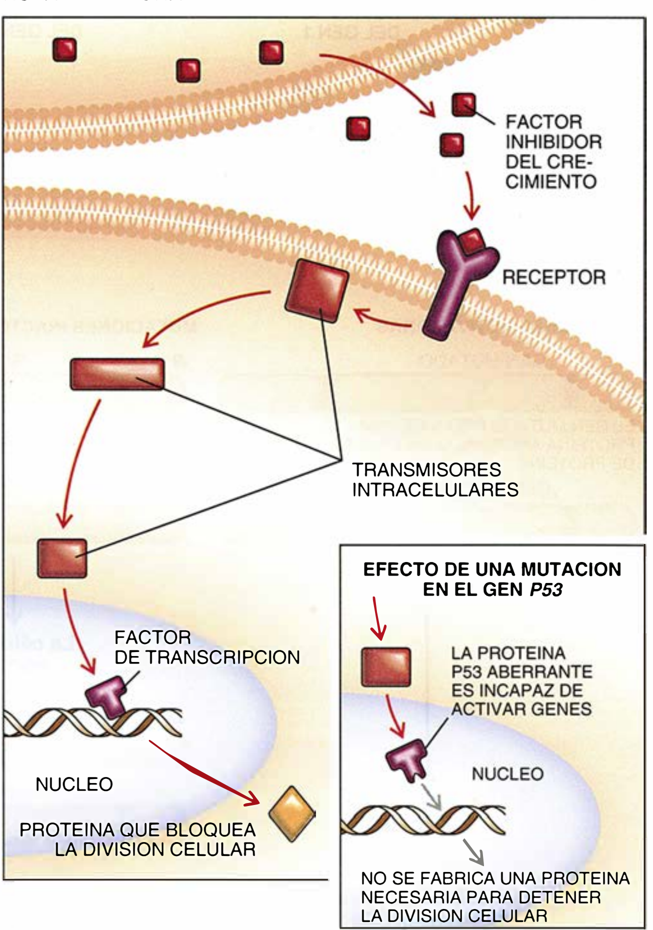












2. LAS CELULAS NORMALES SE REPRODUCEN (*secuencia de la parte superior*) **en respuesta a las señales que les envían factores de crecimiento externos** (*verde*) **y detienen su división en respuesta a factores inhibidores** (*rojo, a la derecha*). **Para que se produzcan esas reacciones, los mensajes que envían los factores deben viajar hasta el interior de la célula diana** (*recuadros grandes*). **Muchos genes que producen cáncer son versiones anómalas de los que cifran las proteínas que participan en las rutas estimuladoras. Los genes alterados, u oncogenes, provocan la síntesis desmesurada de proteínas estimuladoras o la hiperactividad de las mismas. Por ejemplo, una mutación en un gen denominado** *ras* **determina la síntesis de una proteína ras hiperactiva. Otros muchos genes relacionados con el cáncer cifran proteínas que intervienen en rutas inhibidoras; son los supresores de tumores, cuya alteración causa el cáncer si los defectos impiden que se fabriquen proteínas inhibidoras o que funcionen adecuadamente, como ocurre a veces cuando se muta el gen** *p53*.

necesarias para hacer metástasis y colonizar otros órganos.

Si la hipótesis fuese correcta, la mayoría de las células de un tumor portarían los mismos defectos. En tal caso, las terapias capaces de contrarrestar uno o más de esos defectos serían eficaces contra todas, o una gran mayoría, de las células cancerosas, algo que es esencial para erradicar cualquier proceso maligno. Por esta y otras razones, queríamos encontrar indicios de la existencia de evolución clonal en los tumores. Uno de los autores (White) se centró en el cáncer de colon, y el otro (Cavenee) en tumores cerebrales. Fruto de ese trabajo es la identificación de muchos de los genes implicados en esos cánceres.

White abordó el cáncer de colon porque suele originarse a partir de un precursor bien acotado: los pólipos de colon. Si un cáncer procede de manera clonal, cabe esperar que las mutaciones producidas en una fase temprana del desarrollo del tumor estarán también presentes en fases posteriores. Las mutaciones que se vayan acumulando irán definiendo las nuevas fases. Para comprobar experimentalmente esta hipótesis, debemos recoger muestras de fases sucesivas y comparar sus genes. En el caso del colon, las muestras son fáciles de obtener. Cuanto mayor e irregular es el pólipo (microscópico en un comienzo) más accesible resulta a los gastroenterólogos (que extraen las muestras) y, por tanto, a los experimentadores.

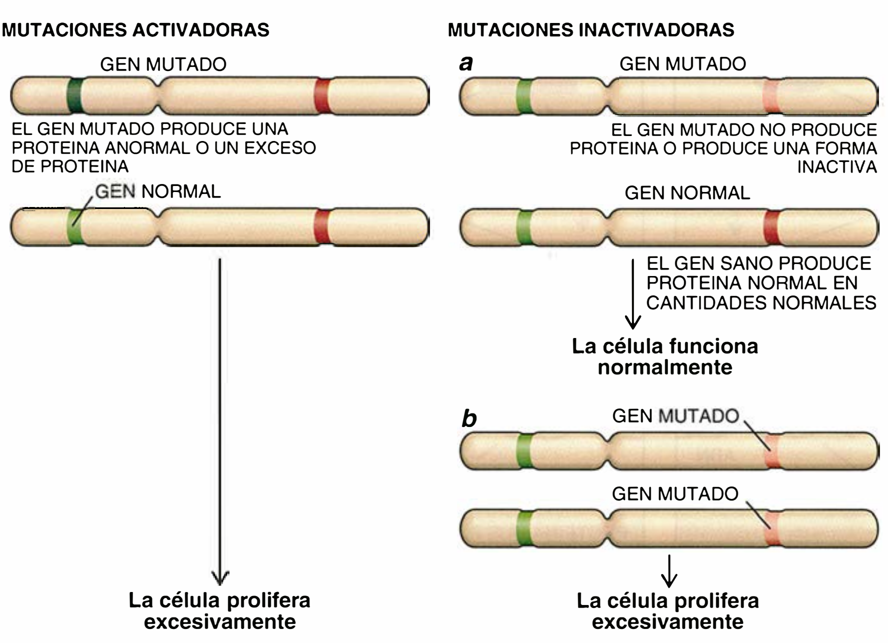
Por otro lado, se habían identificado ya familias con predisposición genética para la poliposis adenomatosa familiar. Podían estudiarse. En los individuos afectados, el colon acaba tapizado por cientos o miles de pólipos; de éstos, uno o varios degenerarán en cancerosos. Un defecto en el gen *APC* (por *c*oli*p*oliposis *a*denomatosa) era responsable de la formación del pólipo en esos pacientes y, por tanto, del desarrollo del cáncer de colon. Cabía suponer que un defecto en el gen *APC* constituyera un hito precoz, si no el primer paso, en la producción de muchos casos esporádicos de cáncer de colon. El aislamiento de ese gen no sólo permitiría poner a prueba la hipótesis, sino contar también con uno de los genes necesarios para comprobar si el cáncer de colon se desarrolla de manera clonal.

En 1987, Mark Leppert y el equipo de Walter E. Bodmer utilizaron, sin previo acuerdo, las técnicas de marcadores antes descritas para demostrar que el gen *APC* reside hacia la mitad del brazo largo del cromosoma 5. Tras intensos trabajos, y algunas colaboraciones entre los laboratorios de White, Yusuke Nakamura y Bert Vogelstein, se pudo localizar el gen con precisión. Se identificaron también varias mutaciones *APC* heredables, que aparecían en tumores de colon esporádicos y familiares. Se definió, por fin, un primer paso en la evolución del cáncer de colon y se obtuvo la confirmación de que los mismos genes aparecen frecuentemente mutados en los dos tipos de tumores, esporádicos y hereditarios.

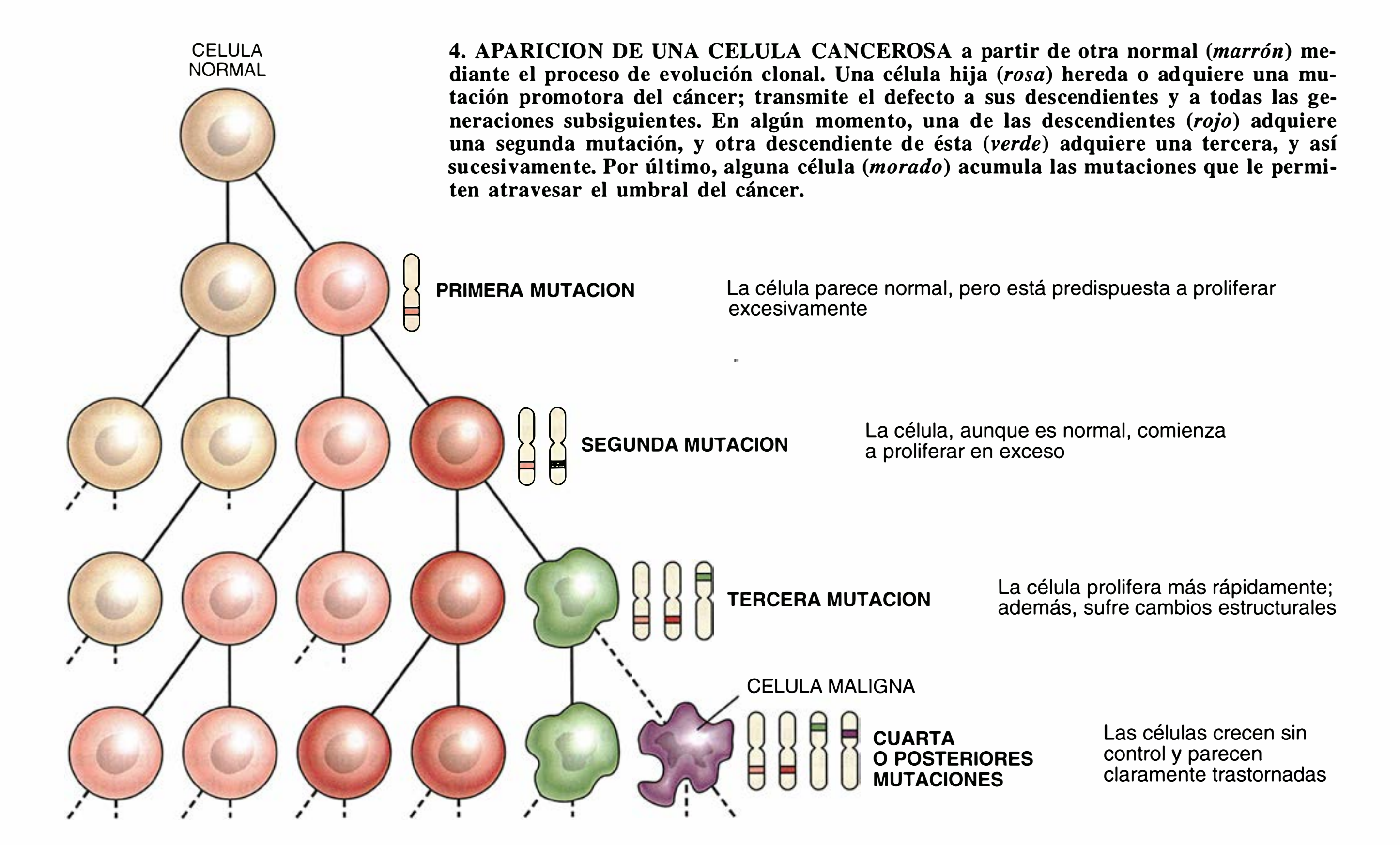
Se halló, asimismo, que todas las mutaciones del gen *APC* relacionadas con el cáncer determinan la producción de una proteína incompleta. Evidentemente, las células podrían funcionar bastante bien si tuvieran un alelo *APC* normal que aportase cierta cantidad de proteína APC completa. Pero si los dos alelos resultasen dañados, desaparecería un freno necesario para la replicación. Se desconoce la misión exacta del gen *APC*, pero ahora que lo tenemos a tiro no tardaremos mucho en definir su función y su papel en el cáncer.

¿Qué sucede cuando el gen *APC* se inactiva? No se sabe. En muchos casos, sin embargo, las mutaciones posteriores de un solo alelo de cierto proto-oncogén parecen empujar al pólipo hacia el estado maligno. Este gen, como observó Manuel Perucho, es uno de los varios genes *ras*. La proteína que determina el gen *ras* normal se sitúa bajo la membrana celular y envía mensajes estimuladores desde los receptores de factores de crecimiento hacia otras moléculas del citoplasma. La versión mutante no espera a que llegue la señal del exterior, sino que expide autónomamente sus propias señales de crecimiento.

Vogelstein y su grupo han demostrado que pólipos y cánceres de colon portan frecuentemente sólo copias



3. LOS GENES SE HEREDAN POR PAREJAS, uno de la madre y otro del padre (*arriba*). A veces, basta una mutación en una sola de las copias para que una célula inicie su camino hacia el cáncer (*izquierda*), cuando determina la producción de una proteína que activa una división celular excesiva (las mutaciones oncogénicas pertenecen a esta categoría). En otras ocasiones, deben alterarse las dos copias; eso ocurre cuando el gen que se inactiva cifra una proteína que detiene la división celular (*derecha*). Si sólo queda afectada una copia de este tipo de genes (*a*), la otra puede producir la proteína necesaria. Si se alteran las dos copias (*b*), se pierde un freno fundamental para el desarrollo del tumor.



4. APARICION DE UNA CELULA CANCEROSA a partir de otra normal (*marrón*) mediante el proceso de evolución clonal. Una célula hija (*rosa*) hereda o adquiere una mutación promotora del cáncer; transmite el defecto a sus descendientes y a todas las generaciones subsiguientes. En algún momento, una de las descendientes (*rojo*) adquiere una segunda mutación, y otra descendiente de ésta (*verde*) adquiere una tercera, y así sucesivamente. Por último, alguna célula (*morado*) acumula las mutaciones que le permiten atravesar el umbral del cáncer.

mutadas de dos genes supresores de tumores. Uno es *p53*, que reside en el cromosoma 17 y está implicado en diversos tipos de cáncer. El producto proteínico normal de ese gen participa en varias rutas metabólicas, entre ellas algunas implicadas en la reparación de los daños producidos en el ADN celular. El otro gen, probablemente *DCC* (por *d*elecionado en el *c*áncer de *c*olon), reside en el cromosoma 18. *DCC* cifra una proteína que aparece en la superficie celular y colabora a que las células del colon permanezcan pegadas unas a otras.

El descubrimiento de que los cambios en el gen *APC* se producen pronto y persisten, mientras que otros cambios aparecen sólo en fases posteriores, cuadra bien con la teoría de la evolución clonal. Al principio, esa conclusión sólo podía partir de premisas de orden estadístico, basadas en el examen de tejidos extraídos de muchos pacientes diferentes. Pero ésa no era forma de demostrar, tajantemente, que las mutaciones que aparecen en una generación celular se transmiten a la descendencia ulterior. Había que recurrir a otras estrategias.

Podemos identificar el pólipo originario de cáncer cuando permanecen juntos. Comparando el ADN del pólipo con el del cáncer adyacente, Vogelstein demostró que todos los eventos mutacionales sufridos por el pólipo aparecían también en el cáncer correspondiente, según predecía la hipótesis de la formación del tumor por evolución clonal. El cáncer, además, incluía invariablemente mutaciones que no se encontraban en el pólipo, según se infería de la hipótesis que atribuía a esas mutaciones adicionales la creciente agresividad de un cáncer. Así, algunos pólipos portaban una mutación *ras*, pero no tenían ningún defecto en el gen *p53*. Sin embargo, los cánceres desarrollados a partir de esos pólipos presentaban las dos mutaciones. Hasta ahora, no hay indicios atendibles de que las mutaciones en los genes *ras*, *p53* y *DCC* deban ocurrir en un orden particular para que un pólipo se torne canceroso, aunque con frecuencia las mutaciones que se producen en primer lugar son las *ras*.

A pesar de estos alentadores descubrimientos, los estudios sobre el cáncer de colon se encuentran con una limitación analítica importante. Para demostrar que un clon de células sufre cambios progresivos en sus genes, es preciso examinar el mismo tumor en el curso del tiempo. En el caso del cáncer de colon, los tumores casi siempre se extirpan en las fases precoces de la detección. Esta práctica, correcta desde un punto de vista clínico, impide su seguimiento a lo largo del tiempo. Por ello, Cavenee y su equipo decidieron en 1987 estudiar un tipo diferente de cáncer: el astrocitoma. Es el tipo más frecuente de tumor cerebral; en dicha enfermedad, tras extirpar el tumor, éste reaparece frecuentemente en el mismo sitio y con mayor agresividad.

El cáncer de cerebro difiere, por lo común, del que padecen otros tejidos. Las células no necesitan invadir tejido conectivo, ni reproducirse para ser letales. La mera proliferación en un sitio crítico para la supervivencia suele bastar para matar al paciente. Por ello, la mayoría de las masas que se producen en el cerebro se denominan cánceres. El grupo de Cavenee examinó la progresión de astrocitomas desde sus fases menos malignas a las más agresivas, tomando como referencia el tamaño y forma de los tumores y la estructura de sus células.

Cuando acometimos la investigación en 1987, no disponíamos de un cuadro de cambios genéticos similar al que se estaba descubriendo para el cáncer de colon. Había que empezar por sentar las bases para futuros estudios de pacientes individuales. Conseguimos tumores de muchos enfermos, los agrupamos según fases, o grados, de progresión de la enfermedad y comparamos los trastornos genéticos descubiertos en cada fase.

En los cuatro años siguientes se avanzó bastante. Por ejemplo, se supo que todos los tumores, cualquiera que

CANCER DE COLON

PERDIDA DEL GEN *APC* (CROMOSOMA 5)

MUTACION ONCOGENICA DE UN GEN *RAS* (CROMOSOMA 12)

PERDIDA DEL GEN *P53* (CROMOSOMA 17)

PERDIDA DE UN GEN DEL CROMOSOMA 18 (POSIBLEMENTE DCC)

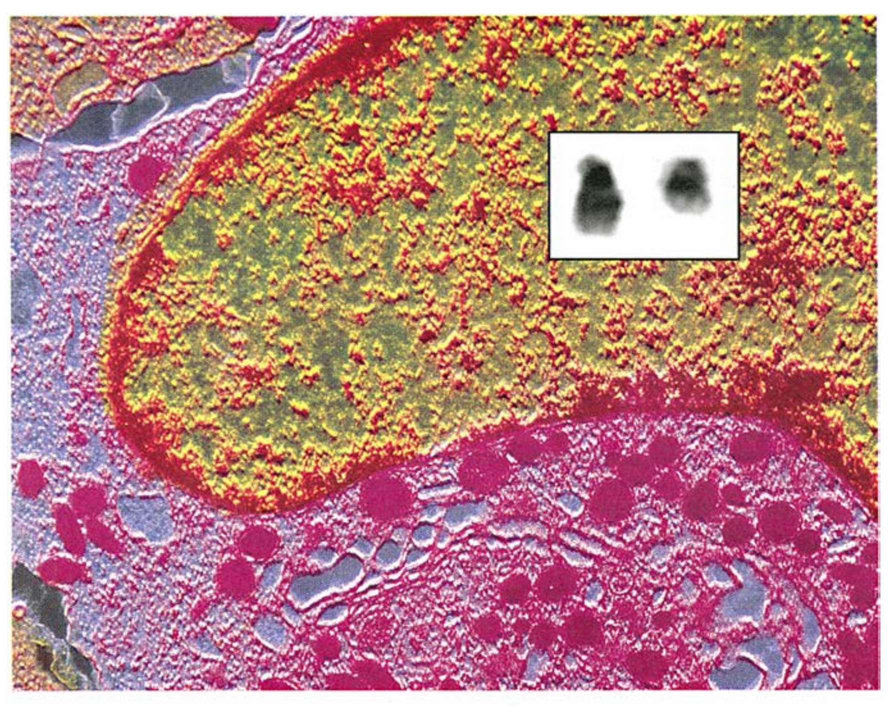
TEJIDO NORMAL → POLIPO PEQUEÑO BENIGNO → POLIPO GRANDE BENIGNO → CANCER

5. CAMBIOS GENETICOS frecuentes (*arriba*) en el desarrollo del cáncer de colon (*izquierda*) o en la progresión de un cáncer de cerebro común (astrocitoma) desde su fase suave a la más agresiva (*derecha*). Intervienen también otros genes

fuese su grado, tenían alteraciones en el cromosoma 17, en un gen que aún no se había identificado. Además, la proporción de tumores que presentaba la mutación en la fase más baja era la misma que en las demás fases. Lo que indicaba que la mutación se produce pronto y persiste. Si una mutación ocurriese avanzada la enfermedad, su frecuencia aumentaría en las fases tardías.

A finales de los ochenta, el laboratorio de Vogelstein había establecido que una de las alteraciones habituales en los cánceres humanos eran las mutaciones en el gen *p53*, del cromosoma 17. Los análisis de las muestras de tejidos obtenidas por Cavenee confirmaron su sospecha de que la mutación que habían localizado en el cromosoma 17 era realmente un defecto en el gen *p53*.

Conocedores de que en otros tipos de tumores cerebrales una determinada región de cromosoma 9 estaba delecionada, C. David James y V. Peter Collins examinaron también ese cromosoma. Las fases media y tardía de los astrocitomas, pero no así las tempranas, presentaban con frecuencia una deficiencia en las dos copias de ese cromosoma. Parecía, pues, probable que la deleción estimulara la progresión desde las fases inferiores a las intermedias. La región que se perdía contenía una agrupación de genes que cifran interferones, proteínas capaces de centrar la atención del sistema inmune sobre células enfermas. Si esos genes se pierden, las células cancerosas pueden presumiblemente evadir la acción del sistema inmunitario. La región ausente podría incluir, además, dos genes recién descubiertos, los *supresores de tumores 1* y *2*, cuyos productos proteínicos están implicados en la regulación de la división celular. La desaparición de cualquiera de esos genes podría contribuir en principio al desarrollo de varios tipos de cáncer.



6. EL CROMOSOMA FILADELFIA (*en el recuadro, a la derecha*) fue la primera anomalía cromosómica ligada a un cáncer específico que se descubrió. En los años sesenta, Peter C. Nowell observó la asociación entre leucemia y aparición de un cromosoma insólitamente pequeño en los leucocitos. La estructura aberrante se forma cuando una versión normal del cromosoma 22 (*en el recuadro, a la izquierda*) intercambia material genético con otro cromosoma. El ADN que recibe el cromosoma 22 se combina con un gen preexistente y crea un oncogén híbrido.

Otro de los resultados obtenidos a partir de los estudios de tejidos, esta vez por Axel Ullrich, Michael D. Waterfield y Joseph Schlessinger, fue que, en los astrocitomas, los cromosomas suelen portar más de una copia del gen que cifra el receptor para el factor de crecimiento epidérmico. Como todas las copias son aptas para sintetizar la proteína, las células exhibirán más receptores en su superficie. Esta abundancia puede ocasionar que la célula reaccione en exceso ante la presencia del factor de crecimiento, alteración que parece hallarse implicada en la progresión de los tumores desde la fase media a la tardía de la enfermedad.

El grupo de Cavenee encontró que en los tumores terminales examinados faltaba una copia del cromosoma 10, una pérdida infrecuente en fases precoces. Semejante ausencia tenía, probablemente, que ver con el avance hacia una fase más virulenta. Pero no sabíamos aún qué gen o genes del cromosoma que se perdía eran los responsables del empeoramiento.

En 1991, estos resultados sugerían que la formación de los tumores cerebrales implicaba, como mínimo, la inactivación del gen *p53*, la pérdida de un gen del cromosoma 9, la multiplicación (amplificación) oncogénica del gen para el receptor del factor

ASTROCITOMA

PERDIDA DEL GEN *P53* — PERDIDA DE UN GRUPO DE GENES DEL CROMOSOMA 9 — PERDIDA DE UNA COPIA DEL CROMOSOMA 10 — MULTIPLICACION DE GENES DEL RECEPTOR DEL FACTOR DE CRECIMIENTO EPIDERMICO (CROMOSOMA 7)

TEJIDO NORMAL — TUMOR DE GRADO BAJO — TUMOR DE GRADO SUPERIOR — FORMA MAS AGRESIVA DEL TUMOR

que no se indican. A menos que se afirme otra cosa, el término "pérdida del gen" señala la lesión o pérdida de las dos copias de un gen supresor de tumor. Las imágenes muestran fragmentos de tejidos.

de crecimiento epidérmico y, en una fase más tardía, la pérdida de al menos una copia del cromosoma 10. Mas, para apuntalar la tesis de que los astrocitomas se originan por acumulación de estos y posiblemente otros defectos celulares, era preciso examinar los cambios genéticos operados a lo largo del tiempo en el cáncer de un mismo paciente.

Por esas fechas, Tom Mikkelsen empezó a comparar las características genéticas de astrocitomas originales con las que presentaban los cánceres recurrentes producidos en los mismos sitios. Este trabajo no se podía haber hecho antes, porque se desconocían los genes implicados. Asimismo, era muy difícil obtener muestra seriadas de tumores del mismo individuo: un paciente tratado por primera vez en una institución podía acudir a otro hospital cuando reaparecía el cáncer. Además, los cirujanos no extirpan tumores recurrentes, cuando creen que la intervención no alargará la vida del enfermo. Para nuestra fortuna, Mark L. Rosenblum y Karl Schwechheimer habían reunido colecciones de tejidos congelados en los que había series de tumores de la misma persona.

El análisis genético de esos tejidos, realizado en colaboración con David Sidransky, nos confirmó las predicciones de la teoría de la evolución clonal. Los tumores originales poseían menos mutaciones que los recurrentes. Las alteraciones incluían uno o varios de los acontecimientos genéticos (como los daños en el cromosoma 17) que se habían identificado en los tumores de grado bajo analizados con anterioridad. Y, lo que revestía mayor interés, en los grados más altos se mostraban todas las alteraciones encontradas en los tumores primarios y otros defectos adicionales (del tipo identificado en los estudios anteriores). Por razones que no son obvias, la progresión de los astrocitomas experimentan una secuencia de cambios genéticos más definida que en el cáncer de colon.

Los resultados expuestos respaldan la tesis según la cual el cáncer se desarrolla y se torna más peligroso por la razón principal de que las células de un mismo linaje acumulan defectos en genes que regulan la proliferación celular. Los cambios operados en otros tipos de genes, muchos de ellos todavía sin identificar, facilitan el crecimiento del tumor, su invasión de tejidos locales y su reproducción en sitios distantes. Las hormonas y otros factores del entorno de las células alteradas genéticamente refuerzan, sin duda, tamaña desregulación.

Quedan cuestiones pendientes. ¿Por qué tipos celulares distintos requieren grupos de mutaciones diferentes para degenerar en cancerosos? ¿Cómo pueden acumularse cinco o más mutaciones en las células? La probabilidad de que una célula que porta una mutación permanente en un gen relacionado con el cáncer adquiera otra mutación en otro gen, también relacionado con el mismo proceso, es muy pequeña.

El descubrimiento de ciertas aberraciones genéticas en una segunda forma de cáncer de colon hereditario (sin vinculación con la poliposis), responde en parte a la última cuestión. Los genes afectados determinan proteínas responsables de identificar y corregir errores que se producen durante la replicación del ADN celular. Si los genes reparadores sufren alteraciones, el número de mutaciones que se transmiten a las células hijas aumenta bastante. Estas, a su vez, transmiten a sus descendientes ADN con nuevas mutaciones. Los defectos en genes de reparación pueden, pues, hallarse involucrados en la alta agresividad de los tumores en fases tardías. Podrían incluso ser responsables de la rapidez con que ciertos tumores surgen y se vuelven devastadores.

Un daño similar podrían causar las mutaciones de efectos múltiples. La lesión del gen *p53* no parece limitarse a levantar la barrera contra la proliferación. Por lo que se ve, ciertas mutaciones reducen la capacidad angiopoyética de la célula. Los vasos supernumerarios del tumor nutren la masa y sirven de conductos a través de los cuales las células malignas pueden propagarse a sitios distantes. Paralelamente, las proteínas anómalas producidas por el gen alterado posibilitan que la célula tumoral resista mejor los efectos destructores de las radiaciones.

Conforme se van conociendo mejor los cambios genéticos que determinan la formación y exacerbación de un cáncer, aumentan las posibilidades terapéuticas de los pacientes. Cuando las mutaciones se producen de una forma secuencial, su identificación en un paciente afectado resulta de inestimable valor a la hora de establecer la fase de la enfermedad y, por tanto, de diseñar una terapia acorde. Además, si sabemos qué genes están mutados en un tumor primario, podremos detectar las recurrencias y descubrir las mutaciones que han ocurrido en tejidos que aún no presentan masas detectables.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE CLONAL EVOLUTION OF TUMOR CELL POPULATIONS. Peter C. Nowell en *Science*, vol. 194, págs. 23-28; 1 de octubre de 1976.

GENETIC AND EPIGENETIC LOSSES OF HETEROZYGOSITY IN CANCER PREDISPOSITION AND PROGRESSION. Heidi J. Scrable, Carmen Sapienza y Webster K. Cavenee en *Advances in Cancer Research*, vol. 54, páginas 25-62; 1990.

A GENETIC MODEL FOR COLORECTAL TUMORIGENESIS. Eric R. Fearon y Bert Vogelstein en *Cell*, vol. 61, n.º 5, págs. 759-767; 1 de junio de 1990.

TUMOR SUPPRESSOR GENES. Robert A. Weinberg en *Science*, vol. 254, páginas 1138-1146; noviembre de 1991.

Vida social de los bonobos

El comportamiento de un pariente cercano del hombre pone en tela de juicio las teorías sobre la supremacía masculina en la evolución de nuestra especie

Frans B. M. de Waal

En esta encrucijada de la historia, cuando las mujeres se afanan por conseguir la igualdad con los hombres, aparece la ciencia con un regalo tardío para el movimiento feminista. Los cuadros evolutivos sesgados hacia el sexo masculino ("hombre cazador", *homo faber*, etcétera) se están poniendo en tela de juicio ante el descubrimiento de que las hembras desempeñan un papel fundamental, dominante quizás, en la vida social de uno de nuestros parientes próximos. En los últimos años se han venido acopiando numerosos datos sobre un antropomorfo bastante desconocido con un repertorio de comportamientos heterodoxo: el bonobo.

Fue uno de los últimos grandes mamíferos que la ciencia descubrió, lo que aconteció hace 66 años en un museo colonial belga, lejos de su lujuriante hábitat africano. Ernst Schwarz, anatomista alemán, estaba investigando un cráneo que, por su volumen pequeño, se había adscrito a un chimpancé juvenil, cuando se dio cuenta de que pertenecía a un adulto. Schwarz declaró haber hallado una nueva subespecie de chimpancé. Pero pronto se concedió al animal la categoría de una especie completamente distinta dentro del mismo género del chimpancé, *Pan*.

El bonobo recibió así la denominación oficial de *Pan paniscus*, el *Pan* diminuto. Aunque, de haberse sabido entonces lo que sabemos hoy, no me cabe la menor duda de que sus descubridores le hubieran impuesto otro nombre. La vieja denominación taxonómica para el chimpancé, *P. satyrus* (que remite a la creencia popular según la cual los simios son sátiros lujuriosos), le hubiera ido pintiparada al bonobo.

La especie, centrada en la hembra y paritaria, substituye la agresión por el sexo. En la mayoría de las demás especies, el comportamiento sexual constituye una categoría autónoma; en el bonobo, por contra, es parte esencial de las relaciones sociales, y no sólo entre machos y hembras. Los bonobos practican el sexo en casi todas las combinaciones posibles entre parejas (aunque los contactos de este tipo entre miembros cercanos de la familia pueden no darse). Interacciones sexuales que se desarrollan en los bonobos con mayor frecuencia que en los demás primates. Pese a ese ejercicio reiterado, la tasa de reproducción del bonobo que vive en libertad es aproximadamente la misma que la del chimpancé. Una hembra pare una cría a intervalos de cinco a seis años. Los bonobos comparten, pues, al menos una característica muy importante con nosotros, a saber, la separación parcial entre el sexo y la reproducción.

Un pariente cercano

Conviene llamar la atención sobre este hecho, porque el bonobo comparte con la especie humana más del 98 por ciento de nuestro perfil genético, lo que lo sitúa tan cerca del hombre como el zorro lo está del perro. Se cree que la divergencia entre el linaje evolutivo del hombre y el linaje del chimpancé y el bonobo aconteció hace sólo ocho millones de años. La posterior separación entre el linaje del chimpancé y el del bonobo llegó mucho más tarde, quizás acelerada por la necesidad del chimpancé de adaptarse a hábitats más o menos abiertos y secos.

Los bonobos nunca abandonaron, probablemente, la protección de los árboles. Su área de distribución actual se encuentra en las selvas húmedas al sur del río Zaire, donde quizá sobreviven menos de 10.000 individuos. (Consideradas la baja tasa reproductora de la especie, la rápida destrucción de su hábitat tropical y la inestabilidad política de Africa central, hay razones para estar muy preocupados por su futuro.)

Si este escenario evolutivo de continuidad ecológica corresponde a la verdad, el bonobo puede haber experimentado menos transformaciones que los seres humanos o los chimpancés. Podría parecerse muchísimo al antepasado común de las tres especies. De hecho, en los años treinta, Harold J. Coolidge (el anatomista americano que dio al bonobo su categoría taxonómica actual) sugirió que el animal podría ser muy similar al progenitor ancestral, ya que su anatomía es menos especializada que la del chimpancé. Las proporciones corporales del bonobo se han comparado con las de los australopitecinos, una forma de seres prehumanos. Cuando los antropomorfos se ponen de pie o andan erguidos, parece como si acabaran de emerger del cuadro que un artista pintara de los homínidos primitivos.

No hace mucho tiempo todavía suponíase que el papión de sabana constituía el mejor modelo vivo del antepasado humano. Este primate se halla adaptado a las condiciones ecológicas con las que los seres prehumanos debieron enfrentarse después de bajar de los árboles. A finales de los años setenta, sin embargo, los chimpancés, con una relación de parentesco mucho más estrecha con los humanos, se convirtieron en el modelo preferido. Rasgos que se observan en los chimpancés (entre ellos la caza cooperativa, el compartir la comida, el empleo de utensilios, la política del poder y una guerra primi-

FRANS B. M. de WAAL, profesor de investigación en el Centro Regional Yerkes de Investigación de Primates en Atlanta, enseña psicología en la Universidad de Emory. Se doctoró en etología por la Universidad de Utrecht en 1977. Después de seis años de estudio de la colonia de chimpancés del zoo de Arnhem, se trasladó a los Estados Unidos para trabajar en otras especies de primates, entre ellas los bonobos.



1. HEMBRA DE BONOBO acariciando a su cría. Los juveniles de bonobo dependen de su madre para la leche y el transporte hasta los cinco años de edad. Son muy bien tolerados por los adultos, que no suelen atacarlos ni amenazarlos.

tiva) faltan o no se encuentran tan desarrollados en los papiones. En el laboratorio, estos antropomorfos han llegado a aprender el lenguaje de signos y a reconocerse en un espejo, una señal de conciencia de sí mismo que falta por demostrar la posean los monos.

Aunque la adopción del chimpancé como hito para trazar la trayectoria evolutiva de los homínidos supuso un gran avance, no obligó a revisar cierto aspecto del modelo precedente: la superioridad del macho seguía constituyendo el estado natural de las cosas. Lo mismo en los papiones que en los chimpancés, los machos dominan sobre las hembras; reinan de forma soberana y, con frecuencia, brutal. Es absolutamente insólito que un macho adulto de chimpancé esté dominado por una hembra.

Y aquí aparece el bonobo. A pesar de su nombre común (chimpancé enano), los bonobos no pueden distinguirse de los chimpancés en razón de la talla. Los machos adultos de la subespecie más pequeña de chimpancé pesan unos 43 kilogramos y las hembras 33 kilogramos, aproximadamente lo mismo que los bonobos. Aunque las hembras de bonobo son bastante más chicas que los machos, mandan ellas por lo que parece.

Antropomorfos elegantes

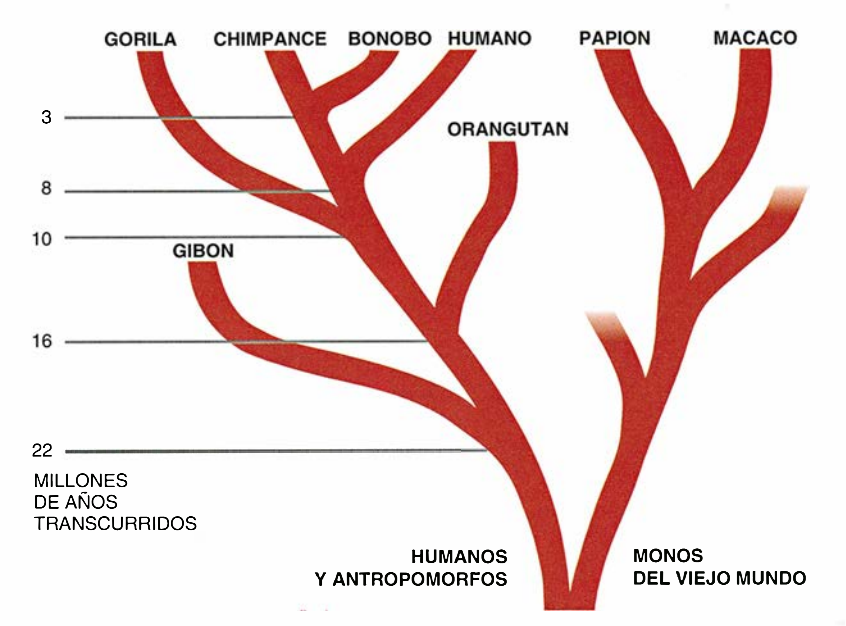
No quisiera ofender a ningún chimpancé, pero los bonobos tienen más estilo. El bonobo, con sus largas piernas y su pequeña cabeza sobre hombros estrechos, presenta una construcción más grácil que el chimpancé. Los labios del bonobo son rojizos en una cara negra, las orejas pequeñas y los orificios nasales casi tan anchos como los de los gorilas. Posee también una cara más plana y abierta, con una frente más elevada que la del chimpancé y, rematándolo todo, un atractivo peinado de pelo negro, largo y fino, limpiamente partido en el medio.

Igual que la hembra chimpancé, la bonobo cría y transporta su retoño durante un período que puede alcanzar los cinco años. Al llegar a los siete años de edad, las crías alcanzan la adolescencia. En la naturaleza, las hembras paren por primera vez a los 13 o 14 años, y alcanzan la madurez completa hacia los 15 años. Se desconoce la longevidad de los bonobos, pero, a juzgar por la del chimpancé, puede ser de más de 40 años en la naturaleza y alrededor de los 60 en cautividad.

Los frutos son ingredientes básicos de la dieta de bonobos y chimpancés que viven en libertad. Los primeros suplementan los frutos con más médula de plantas herbáceas; los chimpancés añaden carne. Aunque los bonobos también comen invertebrados y ocasionalmente capturan pequeños vertebrados, mamíferos incluidos, su dieta parece andar escasa en proteína animal. A diferencia de los chimpancés, no cazan monos, que se sepa.

Los chimpancés emplean una amplia gama de estrategias para procurarse alimento (desde cascar nueces con piedras hasta pescar hormigas y termes con palos); habilidad ésta poco desarrollada por los bonobos en su medio natural. (Los cautivos, en cambio, son diestros en el manejo de útiles.) No menos inteligentes que los chimpancés, los bonobos tienen un temperamento mucho más sensible. Durante el bombardeo de la ciudad alemana de Hellabrun, en la segunda guerra mundial, todos los bonobos de un zoo cercano murieron de miedo ante el estrépito; los chimpancés ni se inmutaron.

Los bonobos son imaginativos a la hora de divertirse. He observado individuos cautivos jugando a la gallinita ciega. Cierta hembra cubría sus ojos con una hoja de plátano, el brazo o un par de dedos. Así impedida, deambulaba tropezando alrededor de



2. ARBOL EVOLUTIVO de los primates, basado en el análisis del ADN. Los seres humanos divergieron de los bonobos y los chimpancés hace sólo ocho millones de años. Las tres especies comparten más del 98 por ciento de su constitución genética.

un trepadero, topando con los demás o a punto de caerse. Parecía seguir una regla que ella misma se había impuesto: "No puedo mirar hasta que pierda el equilibrio". Otros monos y antropomorfos se entregan también a este juego, pero nunca los he visto representarlo con tal dedicación y concentración.

Los jóvenes son empedernidamente juguetones. Les gusta hacer muecas, a veces en prolongadas pantomimas solitarias y en otras ocasiones mientras se hacen cosquillas unos a otros. A la hora de expresar sus emociones (ya se trate de alegría, pena, excitación o miedo) se controlan más que los extravertidos chimpancés. Los machos de éstos suelen desarrollar espectaculares exhibiciones de acometida, donde demuestran su fuerza: arrojan piedras, desgarran ramas y arrancan arbolillos, en ruidosa agitación mientras la mayoría del grupo se mantiene juiciosamente apartada de su camino. En cambio, los machos de bonobo suelen limitar las exhibiciones a una corta carrera durante la que arrastran tras sí unas cuantas ramas.

Ambas especies de primates manifiestan, con expresiones faciales y gestos de las manos, sus emociones e intenciones. Muchas de esas caracterizaciones las volveremos a encontrar en la comunicación no verbal de los humanos. Así, para pedir, los bonobos extienden una mano abierta (o, a veces, un pie) a quien posea alimento, y fruncen los labios y emiten sonidos gimoteantes si el gesto no tiene éxito. Pero emiten unos sonidos peculiares, una suerte de ladridos, bastante altos y agudos, que difieren del jadeo ululante de los chimpancés, de tono grave y prolongado (el conocido "huuu-huuu").

Haz el amor, no la guerra

Mi interés por los bonobos no brotó de ninguna fascinación inmediata por sus encantos. Investigaba yo sobre el comportamiento agresivo de los primates. Me intrigaba en particular el desenlace de los conflictos. El fenómeno, por ejemplo, que se da en los chimpancés: después de que dos han luchado, pueden juntarse para darse un abrazo y besarse en la boca. Dando por supuesto que estas reuniones servían para restablecer la paz y la armonía, las denominé reconciliaciones.

Cualquier especie que combine lazos estrechos con una propensión al conflicto necesita estos mecanismos conciliadores. Mientras pensaba con cuánta mayor rapidez los matrimonios se romperían si las personas no compensaran el daño mutuo infligido, decidí investigar tales mecanismos en diversos primates, entre ellos los bonobos. Aunque también esperaba encontrar conciliación en estos antropomorfos, no sospechaba ni de lejos lo que se me avecinaba.

Para mi estudio, que empezó en 1983, elegí el zoológico de San Diego, que, por aquella época, albergaba la mayor colonia cautiva de bonobos: 10 miembros divididos en tres grupos. Pasé días enteros frente al cercado armado con una cámara de vídeo, que ponía en marcha a la hora de la comida. En cuanto un cuidador se acercaba al recinto con la comida, los machos entraban en erección. Antes incluso de repartirles la pitanza, los bonobos invitaban a sus congéneres al placer venéreo: los machos se insinuaban a las hembras, y éstas a machos y hembras por igual.

El sexo resultó ser la clave para la vida social del bonobo. La primera noticia sobre el peculiar comportamiento sexual de los bonobos procedía de observaciones realizadas en zoológicos europeos. Envolviendo sus hallazgos en un pudibundo latín, los primatólogos Eduard Tratz y Heinz Heck informaron en 1954 que los chimpancés de Hellabrun se apareaban *more canum* (a semejanza de los perros) y los bonobos *more hominum* (al estilo de los humanos). En aquella época, la cópula cara a cara se consideraba una práctica exclusivamente humana, una innovación cultural que había que enseñar a los pueblos ignorantes (de ahí el término "posición del misionero"). Estos primeros estudios, escritos en alemán, pasaron ignorados por la comunidad científica internacional. Hubo que esperar a que la sexualidad cuasihumana del bonobo se redescubriera en los años setenta para que se aceptara como rasgo distintivo de la especie.

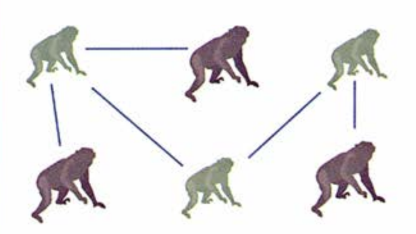
Los bonobos se excitan sexualmente con muchísima facilidad, y expresan esta excitación mediante posiciones de cópula y contactos genitales variados. Los chimpancés casi nunca adoptan la posición cara a cara; en cambio, los bonobos lo hacen en una de cada tres cópulas cuando viven en libertad. La orientación frontal de la vulva y el clítoris del bonobo respalda la idea de que los genitales femeninos se hallan adaptados a esa posición.

Comparten con los humanos una mayor receptividad sexual de la hembra. La fase tumescente de los genitales femeninos, que provoca una hinchazón rosa que señala la disposición al apareamiento, cubre en los bonobos una parte mucho más extensa del estro que en los chimpancés. En vez de mostrarse sexualmente atractiva y activa durante unos días de su ciclo, la hembra de bonobo se manifiesta preparada casi sin solución de continuidad [*véase la ilustración 3*].

Con todo, la pauta sexual más típica del bonobo, no documentada en ningún otro primate, quizás estribe en el fregamiento genitogenital (o fregamiento GG) entre hembras adultas. Una hembra situada frente a otra

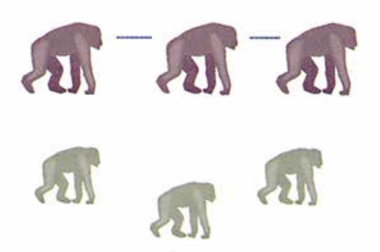
Organización social en diversos primates

BONOBO



Las comunidades de bonobos son pacíficas y, por lo general, paritarias. Los lazos sociales más fuertes (azul) se establecen entre hembras (verde), aunque éstas también se asocian a machos. La condición social de un macho (púrpura) depende de la posición de su madre, a la que permanece estrechamente unido durante toda su vida.

CHIMPANCE



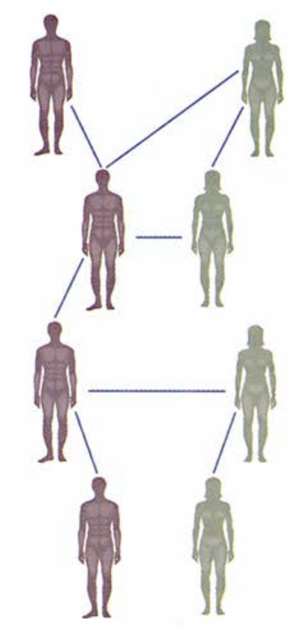
En los grupos de chimpancés, los lazos más fuertes se establecen entre los machos, que así cazan y protegen el territorio que comparten. Las hembras viven en áreas de distribución que se superponen dentro de este territorio, pero no se hallan estrechamente unidas a otras hembras o a un macho en particular.

GIBON



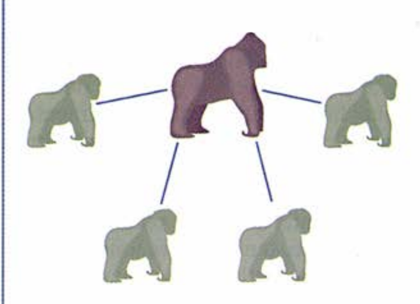
Los gibones establecen relaciones monógamas y paritarias; una pareja mantiene un territorio, del que excluye a otras parejas.

HUMANO



En la sociedad humana encontramos la mayor diversidad de todos los primates. Los machos se asocian entre sí para empresas cooperativas, mientras que las hembras también se unen con las de su propio sexo. Son evidentes tanto la monogamia como la poligamia y la poliandria.

GORILA



La organización social de los gorilas proporciona un claro ejemplo de poligamia. Por lo general, un macho mantiene un territorio para su unidad familiar, a la que pertenecen varias hembras. Los lazos más fuertes son los que hay entre el macho y sus hembras.

ORANGUTAN



Los orangutanes llevan una vida solitaria, sin que sean evidentes demasiados lazos. Los machos no se toleran entre sí. En el apogeo de su vida, el macho establece un territorio grande, en cuyo interior viven varias hembras. Cada hembra posee su propio territorio separado.

se agarra con brazos y piernas a una pareja que, erguida sobre manos y pies, la levanta del suelo. A continuación las dos hembras friccionan lateralmente sus hinchazones genitales, emitiendo sonrisas y chillidos que probablemente reflejan experiencias orgásmicas. (Experimentos de laboratorio en macacos rabones han demostrado que las mujeres no son las únicas hembras de primate capaces de orgasmo fisiológico.)

También los machos de bonobo pueden dedicarse a la pseudocópula, aunque, por lo común, con cierta particularidad. Derechos y espalda contra espalda, un macho friega brevemente su escroto contra las nalgas de otro. También practican lo que se ha llamado esgrima de penes, en la que dos machos cuelgan de una rama, uno frente a otro, mientras se refriegan mutuamente sus penes erectos.

La diversidad de contactos eróticos en los bonobos incluye sexo oral esporádico, masaje de los genitales de otro individuo y besos intensos con la lengua. Pero no quisiera que esto diera la impresión de que el bonobo es una especie patológicamente hipersexual. Tras cientos de horas de observación debo añadir que su actividad sexual es bastante esporádica y relajada. Parece constituir una parte completamente natural de su vida grupal. Al igual que los humanos, los bonobos se dedican al sexo ocasionalmente, no de manera continua. Además, con una cópula media que dura 13 segundos, el contacto sexual es bastante rápido para los usos de nuestra especie.

En los parques zoológicos y en la naturaleza se ha comprobado que el sexo está vinculado a la alimentación; más: permite el compartir la comida. Nancy Thompson-Handler, adscrita por aquel entonces a la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, vio a bonobos de la selva zaireña de Lomako enzarzarse en sexo activo después de haber dado con árboles cargados de higos

maduros, o cuando uno de ellos había capturado a un animal, como un pequeño duikero de bosque. La conmoción de los contactos sexuales duraba de cinco a 10 minutos, pasados los cuales los simios se dedicaban a consumir la comida.

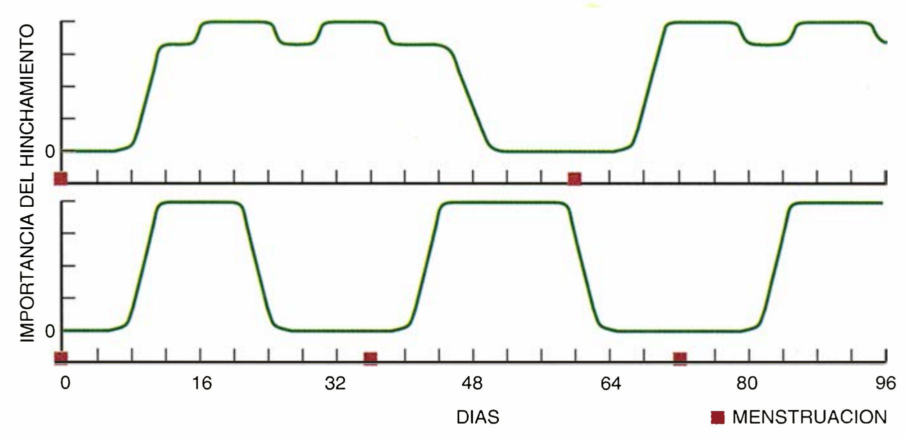
Una explicación de la actividad sexual a la hora de la comida podría ser que la excitación por el alimento se traduce en excitación sexual. Interpretación que quizá sea, en parte, cierta. Pero hay otra motivación, probablemente la causa real: la competencia. Existen dos razones para creer que la actividad sexual es la respuesta del bonobo a fin de evitar el conflicto.

En primer lugar, cualquier cosa, no sólo la comida, que despierta el interés de más de un bonobo a la vez tiende a acabar en contacto sexual. Si dos bonobos se acercan a una caja de cartón que se ha lanzado al interior de su cercado, copularán brevemente antes de jugar con la caja. Tales situaciones provocan peleas en la mayoría de las demás especies. Pero los bonobos son bastante tolerantes, quizá porque utilizan el sexo para desviar la atención y relajar la tensión.

En segundo lugar, el sexo del bonobo suele tener lugar en contextos agresivos que no guardan relación alguna con la comida. Un macho celoso puede ahuyentar a otro de una hembra, después de lo cual los dos volverán a juntarse para enzarzarse en un fregamiento escrotal. Si una hembra golpea a un joven, la madre de éste puede abalanzarse sobre la agresora, acción inmediatamente seguida por un fregamiento genital entre los dos adultos.

En cierta ocasión, observé a Kako, un macho joven, que, aposentado en una rama, obstruía inadvertidamente el paso de Leslie, una hembra joven mayor que él. Leslie le dio primero un empujoncito; Kako, que no se sentía muy seguro en los árboles, se aferró con más fuerza y sonrió nervioso. La hembra le mordisqueó entonces una de las manos, con la presumible intención de que aflojara su asimiento. Kako emitió un pío agudo y se quedó en su sitio. A continuación, Leslie refregó su vulva contra el hombro del macho. Este gesto calmó a Kako, que se movió a lo largo de la rama. Parecía que Leslie había estado muy cerca de usar la fuerza, pero había tranquilizado a Kako, y se había tranquilizado ella, con el contacto sexual.

Durante las reconciliaciones, los bonobos recurren al mismo repertorio sexual que emplean a la hora de la comida. Sobre la base de un análisis de muchos de estos incidentes, aporté las primeras pruebas sólidas del comportamiento sexual entendido como mecanismo para superar la agresión. No es que esta función no se presente en otros animales (o en los humanos, dicho sea de paso), pero bien pudiera ser que el arte de la reconciliación sexual hubiera alcanzado su pico evolutivo en el bonobo. Para estos animales, el comportamiento sexual se funde con el comportamiento social. Dadas sus funciones de conciliación y apaciguamiento, no es sorprendente que el sexo se presente en tantas combinaciones distintas de parejas, incluyendo entre jóvenes y adultos. Es evidente que la necesidad de coexistencia pacífica no se halla restringida a las parejas heterosexuales adultas.



3. RECEPTIVIDAD DE LA HEMBRA al sexo; manifestada por la hinchazón de los genitales, ocupa una proporción del ciclo del estro de los bonobos *(arriba)* mucho mayor que en el caso de los chimpancés *(abajo)*. La receptividad de la hembra no se interrumpe durante la lactación. (En los chimpancés, desaparece.) Esta circunstancia permite que el sexo desempeñe una parte importante en las relaciones sociales de los bonobos. El gráfico se debe a Jeremy Dahl, del Centro de Primates de Yerkes.

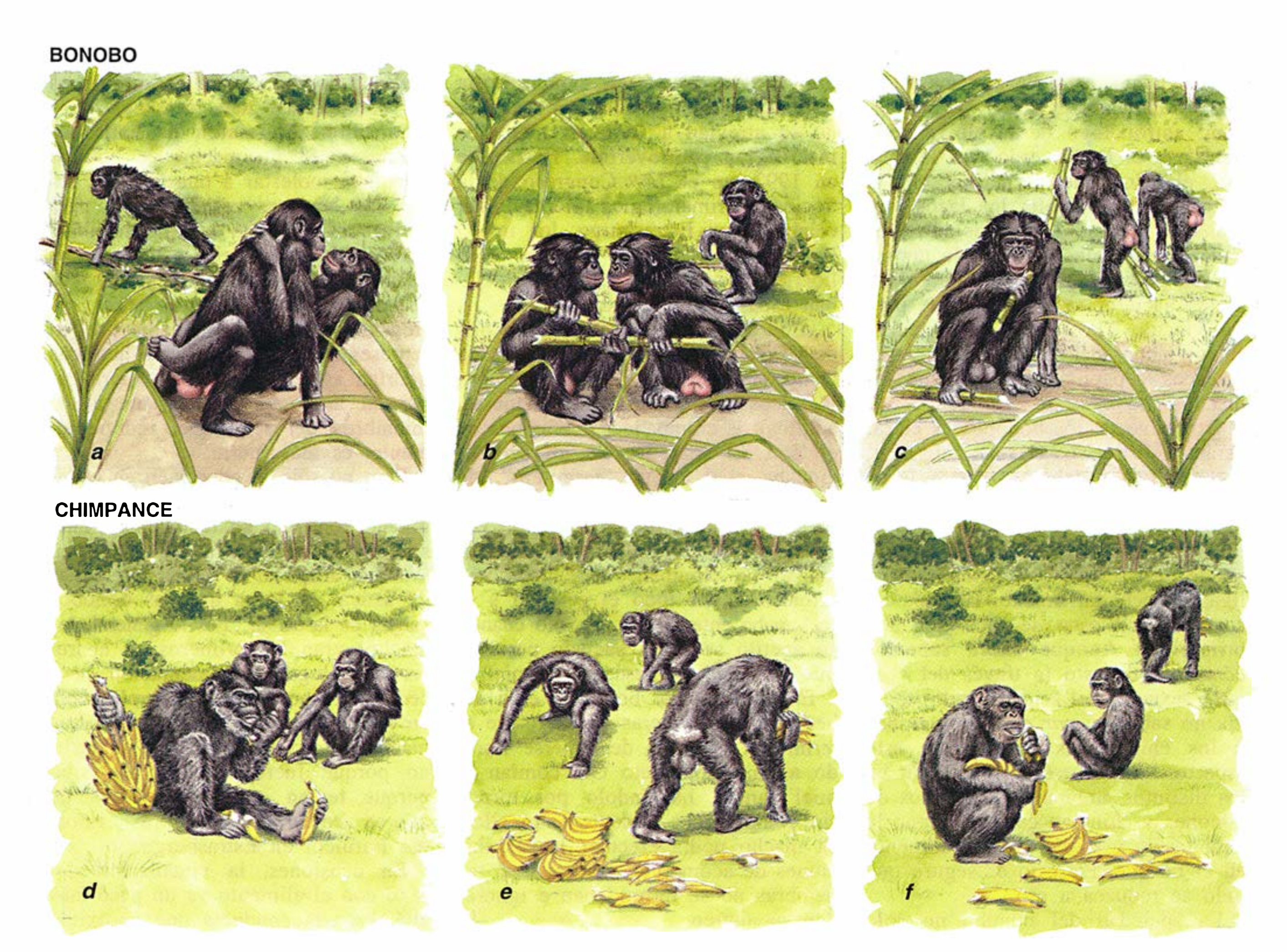
Alianza femenina

Además de mantener la armonía, el sexo está implicado en la creación de la singular estructura social del bonobo. Se advierte con nitidez cuando lo investigamos en su medio natural. Los trabajos de campo sobre los bonobos empezaron a mediados de los años setenta, con una década de retraso sobre los estudios sistemáticos de los chimpancés en libertad. En términos de continuidad y de mano de obra (femenina) invertida, los trabajos sobre chimpancés de Jane Goodall y Toshisada Nishida, ambos en Tanzania, no tienen rival. Pero la investigación sobre los bonobos por Takayoshi Kano y otros investigadores de la Univeridad de Kioto lleva ya dos décadas funcionando en la zaireña Wamba, y está empezando a rendir los mismos frutos.

Bonobos y chimpancés viven en sociedades de fisión-fusión. Los antropomorfos se desplazan solos o en partidas de unos pocos individuos cada vez, cuya composición cambia constantemente. Varios bonobos que viajan juntos por la mañana pueden encontrarse con otro grupo en la selva, después de lo cual un individuo del primer grupo se va con otros del segundo grupo, al tiempo que los que se quedan rezagados buscan comida juntos. Todas las asociaciones, excepto la que se establece entre la madre y los hijos que dependen de ella, son de carácter transitorio.

Semejante flexibilidad intrigó en un principio a los estudiosos. ¿Formaban estos antropomorfos algún grupo social con pertenencia estable al mismo? Después de años de registrar los desplazamientos de los chimpancés en las montañas Mahale, Nishida concluía que integran grandes comunidades: todos los miembros de una comunidad se mezclan libremente en grupos siempre cambiantes, pero los miembros de comunidades distintas no se unen nunca. Goodall añadió más tarde la territorialidad a este cuadro. Es decir, no sólo no se mezclan las comunidades, sino que los machos de comunidades de chimpancés distintas se enzarzan en peleas mortales.

Lo mismo en bonobos que en chimpancés, los machos permanecen en su grupo natal, mientras que las hembras tienden a emigrar durante la adolescencia. Ello significa que los machos más viejos del grupo han conocido a todos los machos más jóvenes desde su nacimiento, y todos los machos jóvenes han crecido juntos. Las hembras, en cambio, se transfieren a un grupo no familiar y



4. DOMINANCIA POR EL VINCULO, evidenciada por estas hembras de bonobo que se dedican a la fricción genitogenital (GG) antes de comer caña de azúcar (*a*), al tiempo que un macho mayor se exhibe en vano. Tras el juego venéreo, las hembras comparten la comida sin competencia (*b*). Sólo cuando se van puede el macho acceder a la caña de azúcar (*c*). En la sociedad chimpancé, dominada por el macho, éste es el que come primero (*d*), mientras las hembras esperan a una distancia segura. Después de haberse ido el macho (*e*), con todos los plátanos que puede, la hembra dominante ha de conformarse con el resto (*f*). (En algunas zonas de investigación de Zaire se suministra a los animales caña de azúcar y plátanos.)

con frecuencia hostil en el que quizá no conozcan a nadie. Pero las sociedades de chimpancés difieren de las de bonobos en la manera en que las hembras jóvenes se integran en su nueva comunidad.

Al llegar a otra comunidad, las jóvenes bonobo de Wamba escogen a una o dos hembras residentes mayores para dispensarles una atención especial, empleando con frecuencia el fregamiento GG y el acicalamiento con el fin de iniciar una relación. Si las residentes responden positivamente, se establecen lazos estrechos, y la joven es aceptada gradualmente en el grupo. Después de engendrar su primer hijo, la posición de la joven hembra se torna más estable y central. Ese proceso se itera con inmigrantes más jóvenes, que a su vez buscan una buena relación con la hembra ahora ya establecida. Por consiguiente, el sexo suaviza la entrada de la advenediza en la comunidad de hembras, que está mucho más trabada en el bonobo que en el chimpancé.

Los machos de bonobo permanecen unidos a su madre por toda la vida, la siguen a través del bosque y dependen de ella para su protección en los encuentros agresivos con otros machos. Como resultado, los machos de categoría más alta en una comunidad de bonobos suelen ser hijos de hembras importantes.

¡Qué contraste con los chimpancés! Los machos de éstos entablan sus propias batallas, fiando a veces de la ayuda de otros. Además, los machos adultos de chimpancé viajan juntos en grupos del mismo sexo, acicalándose unos a otros con frecuencia. Forman una jerarquía social distinta con niveles elevados de competencia y de asociación. Dada la necesidad de permanecer juntos frente a los machos de comunidades vecinas, su mutua dependencia no debe sorprendernos: el fracaso en crear un frente unido podría terminar en la pérdida de vidas y territorio. El peligro de ser macho se refleja en la proporción sexual adulta de las poblaciones de chimpancés, con muchos menos machos que hembras.

En la naturaleza se han observado conflictos graves entre grupos de bonobos, pero parecen ser bastante raros. Se conocen, por contra, incorporaciones pacíficas, que incluyen sexo y acicalamiento mutuos, entre comunidades verosímilmente diferentes. Si el combate entre grupos es insólito, puede entonces entenderse la reducida frecuencia de las asociaciones únicamente masculinas. En vez de fundarse en los lazos entre machos, la del bonobo da la impresión de ser una sociedad basada en los vínculos entre hembras, donde hasta los machos adultos dependen de su madre y no de otros machos. No es extraño que Kano considere a las hembras el "núcleo" de la sociedad del bonobo.

Los lazos entre las hembras de bonobos violan una regla bastante general, señalada por Richard W. Wrangham, antropólogo de la Universidad de Harvard. De acuerdo con la misma, el sexo que permanece en el grupo natal desarrolla los lazos mutuos más fuertes. Los lazos entre los chimpancés macho cumplen la norma, porque permanecen en la comunidad donde nacieron. Lo mismo vale para los vínculos de parentesco femenino en los monos del Viejo Mundo, como macacos y papiones, en los que los machos son el sexo migrador.

Exclusivo de los bonobos es cierto carácter distintivo: el sexo migrador, las hembras, establece fuertes lazos con extraños del mismo sexo en momentos avanzados de la vida. Al conformarse una hermandad artificial, puede decirse que los bonobos están ligados secundariamente. (De los lazos de parentesco se dice que son primarios.) Aunque ahora sabemos *cómo* sucede esto (a través del contacto sexual y del acicalamiento) todavía no sabemos *por qué* los bonobos y los chimpancés difieren en este aspecto. La respuesta puede residir en los distintos ambientes ecológicos de bonobos y chimpancés, tales como la abundancia y la calidad del alimento en el bosque. Pero no es seguro que todo se reduzca a eso.

La sociedad del bonobo no sólo está centrada en las hembras, sino que parece ser dominada por las hembras. Los especialistas, aunque hacía tiempo que sospechaban tal realidad, no se atrevían a formular una afirmación tan controvertida. Hasta que en 1992, en el 14.º Congreso de la Sociedad Primatológica Internacional, celebrado en Estrasburgo, los investigadores de bonobos cautivos y en libertad presentaron datos que dejaban escaso margen para la duda.

Amy R. Parish, de la Universidad de California en Davis, informó de la competencia por el alimento en grupos idénticos (un macho y dos hembras, adultos) de chimpancés y bonobos en el Zoo de Stuttgart. Se les proporcionaba miel en un "termitero", de donde podían extraerla introduciendo palitos a través de un orificio. Tan pronto como disponía de la miel, el macho de chimpancé efectuaba una arremetida por todo el cercado y la reclamaba entera para él. Sólo cuando su apetito se había saciado permitía que las hembras pescaran la miel.

En el grupo de bonobos, eran las hembras las primeras en acercarse al termitero. Después de haberse librado a un fregamiento GG comían la miel juntas, haciéndolo por turnos sin competencia evidente entre ellas. El macho podía efectuar las exhibiciones de acometida que quisiera; las hembras no se intimidaban e ignoraban su ajetreo.

Observadores del parque de fieras belga de Planckendael, que en la actualidad posee la colonia de bonobos en condiciones más cercanas a la vida libre, informaron de hallazgos similares. Si un macho de bonobo intentaba molestar a una hembra, todas las hembras se agrupaban para ahuyentarlo. Puesto que las hembras parecen dominar mejor a los machos cuando están juntas que yendo por su cuenta, su asociación estrecha y su fregamiento genital frecuente pueden representar una alianza. Las hembras podrían así establecer lazos para ganar en la competencia frente a los miembros del sexo que, individualmente, es más fuerte.

Pero no sólo lo consiguen en cautividad. Takeshi Furuichi expuso en el mismo congreso un resumen de cuál sea la relación entre los sexos en Wamba; allí, con el señuelo de cañas de azúcar se logra que los bonobos salgan de la selva. "Por lo general, los machos eran los primeros en aparecer en el lugar de alimentación, pero cedían las posiciones de preferencia en cuanto llegaban las hembras. Los machos parecían adelantarse al lugar, no porque fueran dominantes, sino porque tenían que comer antes de que se acercaran las hembras", informó Furuichi en Estrasburgo.

En ocasiones, la vinculación del sexo con el alimento va un paso más allá, en una conducta que aproxima todavía más los bonobos a los huma-









5. COMPORTAMIENTO de los bonobos. La madre juega con la cría *(izquierda)*; dos jóvenes practican el sexo sin penetración *(centro, arriba)*; un bonobo anda erecto, empleando sus manos para transportar alimento *(derecha)*; y un macho y una hembra en pleno acto sexual *(centro, abajo)*, después del cual la hembra se va con una de las dos naranjas del macho.

nos. C. Owen Lovejoy, de la Universidad estatal de Kent, Helen Fisher, de la Universidad de Rutgers, y otros antropólogos atribuyen la parcial separación que se da, en nuestra especie, entre sexo y reproducción a su fuerza para consolidar relaciones mutuamente provechosas entre hombres y mujeres. La capacidad de la hembra humana de aparearse durante todo su ciclo y su fuerte impulso sexual le permiten trocar sexo por fidelidad y cuidado paterno del macho, lo que dio origen a la familia nuclear.

Se cree que esta disposición fue favorecida por la selección natural, pues permite a las mujeres criar más hijos que si tuvieran que apañárselas solas. Aunque es evidente que los bonobos no establecen los lazos heterosexuales exclusivos que caracterizan a nuestra especie, su comportamiento encaja con elementos importantes de este modelo. Las hembras se muestran casi siempre receptivas y recurren al juego sexual para obtener los favores del macho si aquéllas, por su juventud sobre todo, se hallan en un nivel social demasiado bajo para dominarlo.

Sexo a cambio de comida

En el zoo de San Diego observé que, si Loretta se encontraba en un estado sexualmente receptivo, no dudaba en acercarse a Vernon, en el caso de que éste tuviera comida. Exhibiéndose ante el macho, se apareaba con él y emitía agudos gritos solicitando comida al tiempo que se apoderaba de todo su manojo de ramas y hojas. Cuando Loretta no presentaba hinchazón genital, esperaba hasta que Vernon estuviera dispuesto a compartir. El primatólogo Sueisha Kuroda informa de intercambios similares en Wamba: "Una hembra joven se acercó a un macho, que estaba comiendo caña de azúcar. Copularon enseguida, después de lo cual ella tomó una de las dos cañas que tenía el macho y se alejó."

A pesar de estos trueques entre los sexos, no hay pruebas de que los bonobos formen familias nucleares al estilo de las humanas. El peso de la crianza parece recaer por entero sobre las espaldas de la hembra. La verdad es que las familias nucleares no parecen avenirse con el uso plural del sexo que practican los bonobos. Si nuestros antepasados empezaron con una vida sexual similar a la de los bonobos, la evolución de la familia habría requerido un cambio espectacular.

La vida de la familia humana implica una inversión paterna, que es improbable que se desarrolle a menos que los machos estén razonablemente seguros de que cuidan de sus propios hijos y no de los de otro macho. La sociedad del bonobo carece de esta garantía, pero los seres humanos protegen la integridad de sus unidades familiares mediante todo tipo de restricciones morales y de tabúes. Así, aunque nuestra especie se caracteriza por un interés extraordinario en el sexo, no existen sociedades en las que la gente se dedique a él bajo cualquier pretexto. Un sentimiento de pudor y un deseo de intimidad doméstica son conceptos humanos típicos relacionados con la evolución y el reforzamiento cultural de la familia.

Pero no existe grado alguno de moralización que pueda hacer que el sexo desaparezca de todos y cada uno de los rincones de la vida humana que no esté relacionado con la vida nuclear. Las peculiaridades de comportamiento del bonobo pueden ayudarnos a comprender el papel del sexo y pueden tener implicaciones importantes para los modelos de sociedad humana.

Imaginemos por un momento que nunca hubiéramos oído hablar de los chimpancés o de los papiones y hubiéramos conocido primero a los bonobos. Con toda seguridad, ahora creeríamos que los primeros homínidos vivían en sociedades basadas en las hembras, en las que el sexo desempeñaba funciones sociales importantes y en las que la guerra era un fenómeno raro o desconocido. Al final, quizá la reconstrucción más adecuada de nuestro pasado no se fundará ni en los chimpancés ni en los bonobos, sino en una comparación a tres bandas: chimpancés, bonobos y seres humanos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PYGMY CHIMPANZEE: EVOLUTIONARY BIOLOGY AND BEHAVIOR. Dirigido por Randall L. Susman. Plenum Press, 1984.

THE COMMUNICATIVE REPERTOIRE OF CAPTIVE BONOBOS (*PAN PANISCUS*) COMPARED TO THAT OF CHIMPANZEES. F. B. M. de Waal en *Behaviour*, vol. 106, n.º 3-4, págs. 183-251; septiembre 1988.

PEACEMAKING AMONG PRIMATES. F. B. M. de Waal. Harvard University Press, 1989.

UNDERSTANDING CHIMPANZEES. Dirigido por Paul Heltne y Linda A. Marquardt. Harvard University Press, 1989.

THE LAST APE: PYGMY CHIMPANZEE BEHAVIOR AND ECOLOGY. Takayoshi Kano. Stanford University Press, 1992.

CHIMPANZEE CULTURES. R. Wrangham, W. C. McGrew, F. B. M. de Waal y P. Heltne. Harvard University Press, 1994.

Ordenadores de base proteínica

Ciertos dispositivos fabricados a partir de moléculas biológicas prometen tamaño más reducido y almacenaje de datos más rápido. Pueden servir para ordenadores de procesamiento en paralelo y redes neuronales

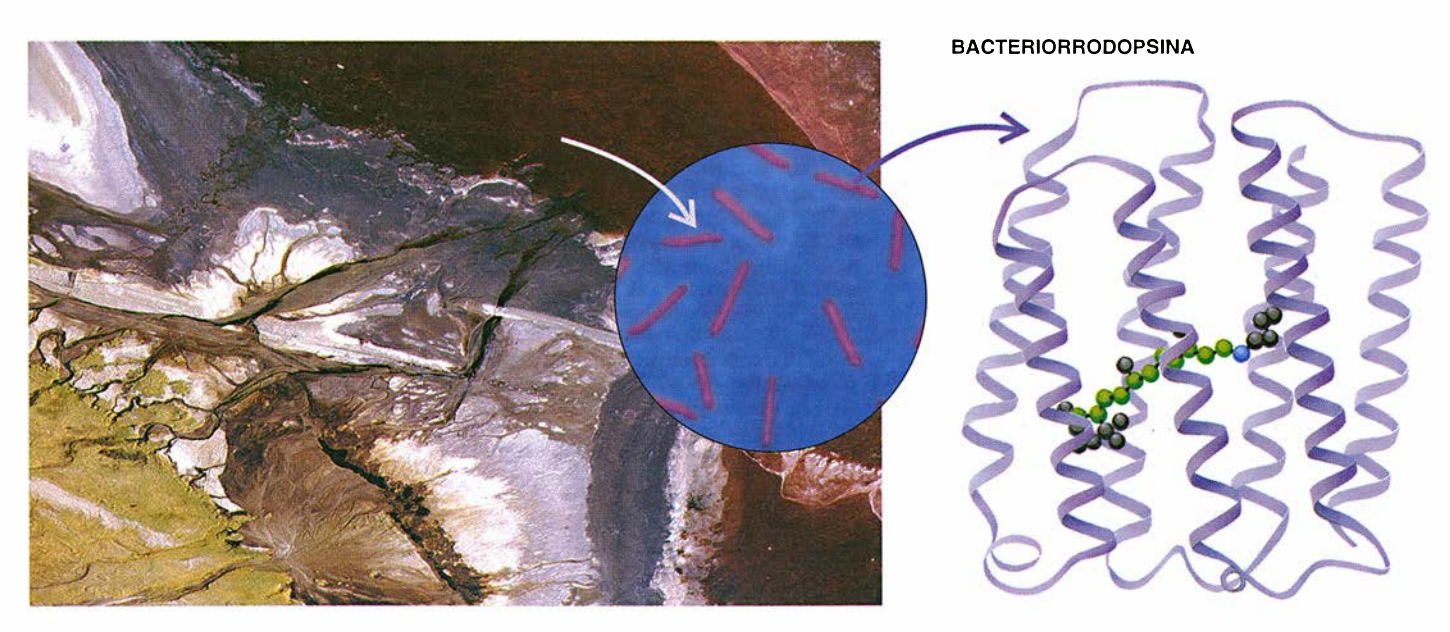
Robert R. Birge

El superordenador más avanzado del mundo no necesita ningún microcircuito semiconductor. El cerebro humano está formado por moléculas orgánicas que, combinadas, tejen una red sumamente complicada y perfecta, capaz de calcular, percibir, manipular, repararse a sí misma, pensar y sentir. Es cierto que los ordenadores digitales pueden efectuar cálculos con una velocidad y precisión mucho mayores que las personas, pero en los otros cinco campos, hasta los organismos elementales aventajan a los ordenadores. Quizá nunca lleguen a crearse máquinas que posean todas las facultades del cerebro. Aun así, muchos opinamos que se puede sacar partido de ciertas propiedades especiales de las moléculas biológicas —en especial de las proteínas— para la construcción de componentes informáticos que sean más pequeños, potentes y veloces que cualesquiera dispositivos electrónicos que hasta ahora se hayan paseado por los tableros de diseño.

La cuestión del tamaño es acuciante. Desde los años sesenta, la industria se ha visto compelida a reducir cada vez más los componentes de los microcircuitos semiconductores, para fabricar memorias mayores y procesadores más potentes. Tales microcircuitos consisten, en esencia, en matrices de conmutadores, puertas lógicas normalmente, que van tomando uno de dos estados (0 y 1) en respuesta a cambios en la corriente eléctrica que pasa a su través. (Lo típico es representar toda la información mediante tales dígitos binarios, o bits.) De proseguir la tendencia hacia la miniaturización, el tamaño de una puerta lógica será, antes de 40 años, el de una molécula.

Pero existe un grave obstáculo. Cada vez que se duplica la miniaturización, el costo de fabricación del microcircuito se multiplica por cinco. Puede llegar el punto en que la búsqueda de dispositivos electrónicos cada vez menores se vea limitada más por consideraciones económicas que por consideraciones físicas. Por otra parte, es posible que al utilizar moléculas biológicas con carácter de componentes activos de la circuitería de los ordenadores aparezcan opciones técnicas menos caras.

Las moléculas pueden actuar de conmutadores lógicos porque sus átomos son móviles y cambian de posición de forma predictible. Si logramos dirigir ese movimiento atómico y generar sistemáticamente en cada molécula al menos dos estados, podremos valernos de cada uno para representar, ora 0, ora 1. Tales conmutadores ofrecen reducciones del tamaño de los equipos porque son intrínsecamente pequeños: una milésima del tamaño de los transistores de semiconductor utilizados hoy como puertas (cuyo diámetro ronda la micra, o sea, una millónesima de metro). De hecho, un ordenador biomolecular podría, en teoría, ser la quincuagésima parte de un ordenador actual de semiconductores que contuviera similar número de elementos lógicos. La reducción del tamaño de las puertas desemboca en dispositivos más veloces, y los ordenadores de base proteínica podrían, en teoría, operar a velocidad 1000 veces mayor que los ordenadores modernos.



Nadie propone todavía un ordenador puramente molecular. Es mucho más probable, al menos en un futuro cercano, que se utilice una tecnología híbrida, que combine moléculas y semiconductores. Tal proceder debería proporcionar ordenadores cincuenta veces menores que los actuales y centuplicar su velocidad.

Las moléculas biológicas también resultan atractivas porque pueden diseñarse átomo a átomo, confiriendo así a los ingenieros el control necesario para crear puertas que funcionen de acuerdo con los requerimientos de una aplicación. Además, los ordenadores bioelectrónicos facilitarían la búsqueda de prototipos más adaptables. Se está reforzando la versatilidad de los dispositivos electrónicos con equipos de nueva configuración o, como se dice en la jerga, de nueva arquitectura.

Se han introducido arquitecturas de procesamiento en paralelo, que permiten la manipulación simultánea de múltiples sistemas de datos. Para ampliar la capacidad de las memorias se están ideando elementos que almacenen datos en tres dimensiones, en lugar de las dos habituales. Y se han construido redes neuronales que remedan la facultad de aprendizaje por asociación que posee el cerebro, facultad que es necesaria para lograr avances de importancia hacia la inteligencia artificial. La capacidad de ciertas proteínas para cambiar sus propiedades en respuesta a la luz debería simplificar los equipos físicos necesarios para llevar a la práctica dichas arquitecturas.

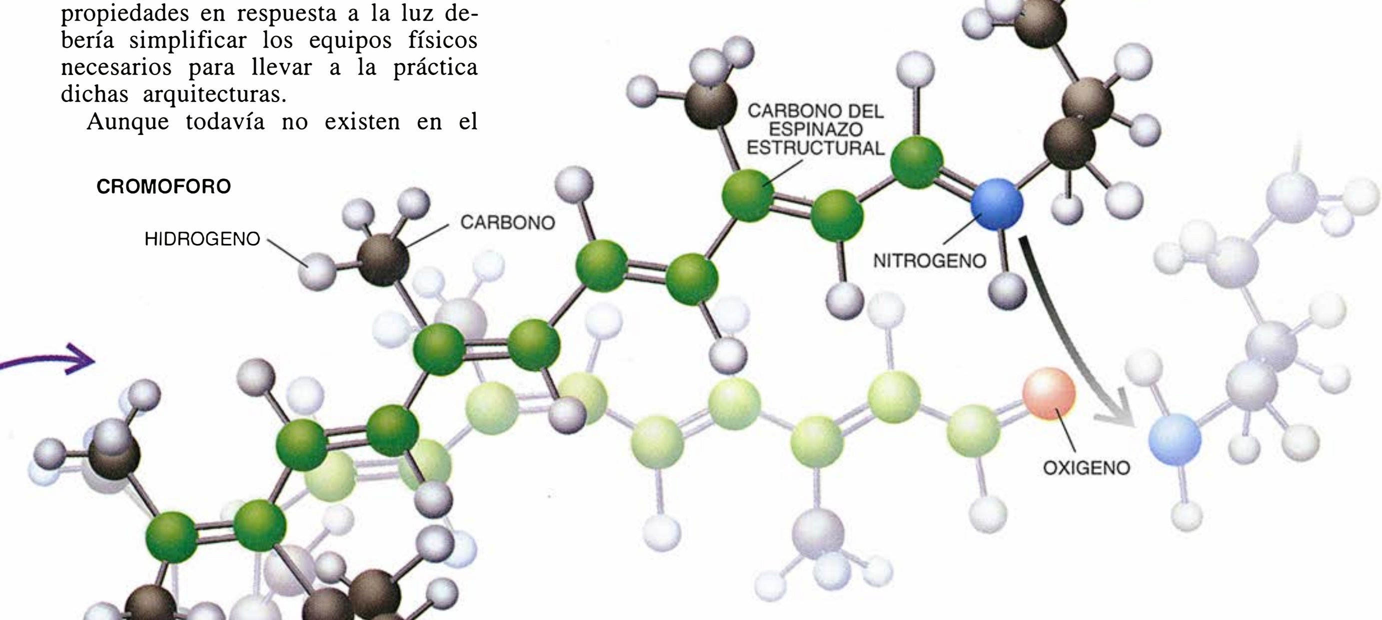
Aunque todavía no existen en el mercado componentes informáticos formados, en todo o en parte, por proteínas, los continuados esfuerzos de la investigación se están abriendo paso hacia esa meta. Parece razonable pronosticar que la técnica híbrida, que conjuga microcircuitos semiconductores y moléculas biológicas, pasará bastante pronto del dominio de la fantasía científica a las aplicaciones comerciales. Las pantallas de cristal líquido ofrecen un espléndido ejemplo de sistema híbrido que ha triunfado. Casi todos los ordenadores portátiles de nuestros días se basan en pantallas de cristal líquido, que combinan dispositivos semiconductores con moléculas orgánicas para controlar la intensidad de la imagen en la pantalla.

Son varias las moléculas biológicas que se están estudiando con vistas a su utilización en componentes informáticos, pero ha sido una proteína bacteriana, la bacteriorrodopsina, la que ha suscitado mayor interés. A lo largo de los diez últimos años, mi laboratorio, y otros de Norteamérica, Europa y Japón han construido prototipos de dispositivos de procesamiento en paralelo, elementos de almacenamiento volumétrico y redes neuronales que se basan en esta proteína.

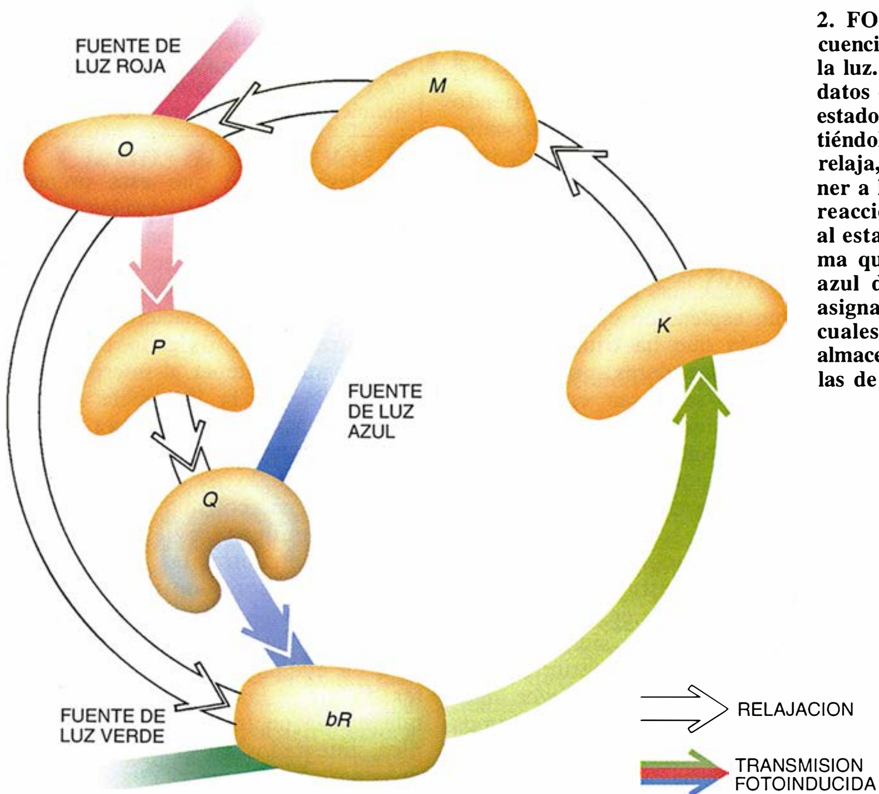
El interés por la bacteriorrodopsina se remonta a los años setenta, cuando Walther Stoeckenius y Dieter Oesterhelt descubrieron que esta proteína exhibía insólitas propiedades al ser expuesta a la luz. La bacteriorrodopsina, que se encuentra en la membrana de *Halobacterium salinarium*, permite el crecimiento de la bacteria cuando la concentración de oxígeno es insuficiente para mantener al microorganismo. Al incidir la luz sobre ella, la proteína modifica su estructura y transporta un protón a través de la membrana, aportando así energía para alimentar el metabolismo celular.

Los científicos soviéticos reconocieron y abordaron las posibilidades que la bacteriorrodopsina ofrece en computación. Al poco de su descubrimiento, Yuri A. Ovchinnikov organizó un equipo de expertos procedentes de cinco instituciones soviéticas, que habría de trabajar en bioelectrónica, integrados en el "proyecto Rodopsina". Ovchinnikov consiguió que los altos mandos militares le escucharan, y les convenció de que, al explorar la bioelectrónica, la ciencia

ROBERT R. BIRGE, experto en dispositivos electrónicos de base proteínica y en ordenadores híbridos, enseña química en la Universidad de Syracusa.



1. LAS AGUAS SALOBRES del californiano lago de Owens (*izquierda*) presentan un matiz azulado, causado por bacterias (*inserto*) que contienen bacteriorrodopsina. Esta proteína, aquí representada por una cinta (*centro*), porta un cromóforo (*estructura esquelética de esferas y enlaces lineales*) que absorbe la luz. Cuando este segmento se excita por la luz, su estructura cambia (*derecha*) alterando la configuración del resto de la proteína. Puesto que la bacteriorrodopsina responde a la luz adoptando estados diferentes y fácilmente detectables, puede servir para puertas lógicas, o conmutadores, en ordenadores ópticos de base proteínica.



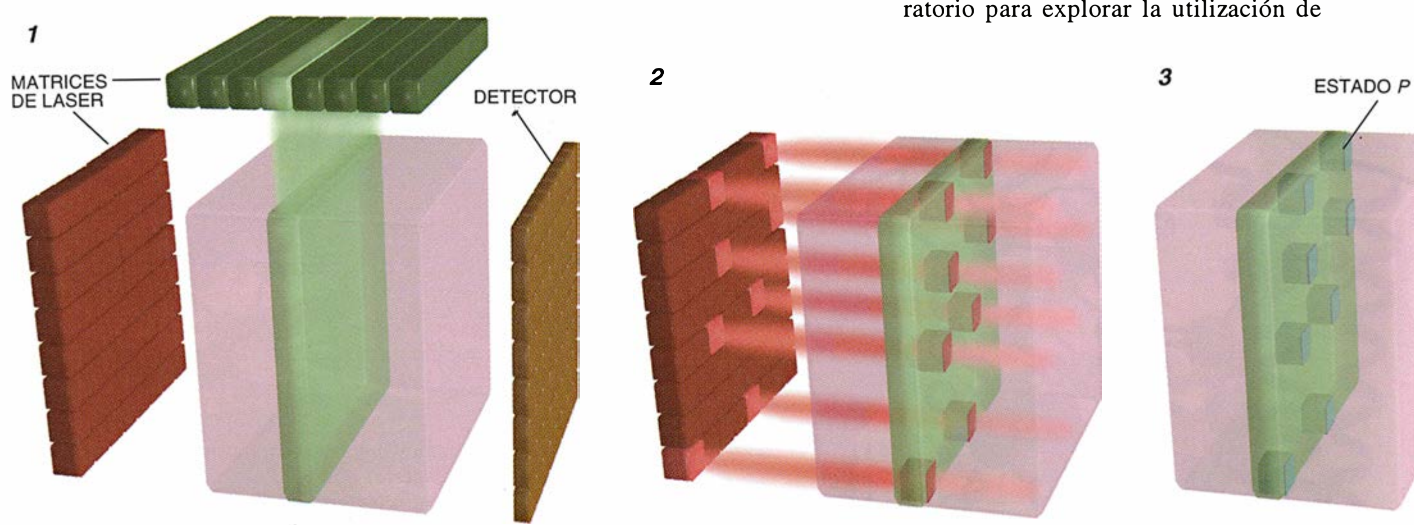
2. FOTOCICLO de la bacteriorrodopsina: secuencia de cambios estructurales inducidos por la luz. El fotociclo permite el almacenamiento de datos en la memoria. La luz verde transforma el estado inicial de reposo, conocido por *bR*, convirtiéndolo en el intermedio *K*. A continuación, *K* se relaja, formando primero *M* y luego *O*. Al exponer a la luz roja el intermedio *O*, se produce una reacción de ramificación. La estructura *O* pasa al estado *P*, que rápidamente se relaja al *Q*, forma que permanece estable. Sin embargo, la luz azul devolverá *Q* al estado *bR*. Se les pueden asignar los valores binarios 0 y 1 a dos estados cualesquiera de larga duración, lo que permite almacenar información mediante series de moléculas de bacteriorrodopsina en uno u otro estado.

soviética se adelantaría a la tecnología informática del Oeste.

Son muchos los aspectos de este ambicioso proyecto que permanecen bajo secreto militar. Sabemos de cierto que el ejército rojo hizo películas de microfilmación, llamadas biocromo, a partir de bacteriorrodopsina. Informes extraoficiales de antiguos científicos soviéticos hoy residentes en los Estados Unidos indican que se construyeron también procesadores ópticos de datos con técnicas proteínicas. Siguen vedados los detalles de su logro más impresionante: un procesador para radares militares.

Empecé a interesarme por la bacteriorrodopsina en los años setenta, mientras estudiaba las bases bioquímicas de la visión en la Universidad de California en Riverside. Mi trabajo se había centrado en una proteína afín, la rodopsina, presente en la retina de los mamíferos. Tanto la rodopsina como la bacteriorrodopsina son proteínas complejas que contienen un componente que absorbe la luz, que recibe el nombre de cromóforo. El cromóforo absorbe energía de la luz, desencadenando una serie de movimientos internos que modifican la estructura de la proteína que lo contiene. Dichas modificaciones alteran las características ópticas y eléctricas de la proteína. Por ejemplo, en el interior del ojo humano, cuando la rodopsina absorbe luz, su cambio de estructura libera energía, que sirve de señal eléctrica para el transporte de información visual hasta el cerebro.

Al principio, me interesaba cómo se producían en la rodopsina tales cambios activados por la luz. Pero muy pronto dirigí la mirada hacia la bacteriorrodopsina. Había decidido aplicar mi conocimiento de sus propiedades al diseño de memorias y procesadores de ordenador que se basaran en esa proteína. Albert F. Laurence me convenció de las posibilidades de la bioelectrónica. Se incorporó durante un año a mi laboratorio para explorar la utilización de



3. LA ESCRITURA DE INFORMACION en cubos de bacteriorrodopsina (*violeta*) y la lectura de tal información se consiguen mediante haces de láser. El proceso de escritura comienza disparando haces de láser de color verde a través de un plano del cubo (*1*); este paso inicia el fotociclo de la proteína. A continuación se disparan láseres rojos (*2*) sobre el conjunto de moléculas de dicho plano (*verde*) que han de convertirse al estado binario 1; las moléculas restantes representan el estado 0.

materiales biológicos en memorias ópticas.

Nos centramos en la bacteriorrodopsina, y no en la rodopsina, porque la primera posee mayor estabilidad y mejores propiedades ópticas. Podía, además, prepararse en grandes cantidades. Los componentes de los ordenadores han de poder soportar cambios en su ambiente sin estropearse. En condiciones naturales, la bacteriorrodopsina opera en marismas, cuyas temperaturas pueden superar los 65 grados y donde la molécula queda expuesta muchas veces a luz intensa.

Las aplicaciones estudiadas con miras a obtener procesadores de ordenador y las memorias sobre las que éstos operan se apoyan en el fotociclo, serie de cambios estructurales que experimenta la bacteriorrodopsina en respuesta a la luz. (En estado de reposo la molécula se denomina *bR*; cada estado intermedio de la serie se identifica mediante una letra del alfabeto.) Los distintos intermedios —abreviatura de estados intermedios— pueden utilizarse para la representación de bits de datos.

Los intermedios absorben luz en distintas regiones del espectro. Podemos, en consecuencia, leer los datos iluminando las moléculas con haces de láser y observando qué longitudes de onda no pasan hasta el detector. Puesto que podemos alterar la estructura de la bacteriorrodopsina con un láser y determinar después, con otro láser, qué estados intermedios se han formado, disponemos de la base necesaria para grabar la memoria y después leerla.

La mayoría de los dispositivos se basan en el estado de reposo y en un intermedio de la bacteriorrodopsina. Uno de los estados se designa 0, y el otro, 1; la conmutación entre estados se controla mediante un haz de láser. Muchos de los primeros dispositivos de memoria basados en la bacteriorrodopsina sólo podían operar a la temperatura, bajísima, del nitrógeno líquido, a la cual resultaba controlable la transición entre la estructura *bR* inicial y un estado *K* intermedio. Dichos dispositivos eran rápidos en comparación con los conmutadores de semiconductores (la transición de *bR* a *K* se produce en pocas billonésimas de segundo —picosegundos— frente a las milmillonésimas —nanosegundos— que requieren los dispositivos ordinarios de semiconductores). Pero la necesidad de tan bajas temperaturas impedía que fueran de aplicación general.

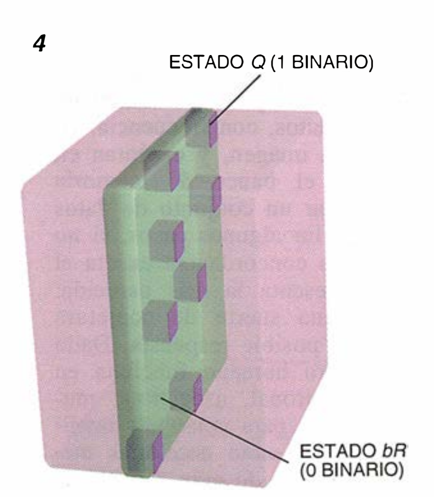
Hoy, la mayoría de los dispositivos basados en bacteriorrodopsina funcionan a la temperatura ambiente o cercana a ella, condición en la cual es estable otro estado intermedio, llamado *M*. Aunque casi todos los dispositivos de memoria basados en la bacteriorrodopsina incorporan el conmutador *bR* a *M*, puede que para sistemas de cómputo de base proteínica resulten más útiles en la práctica otras estructuras.

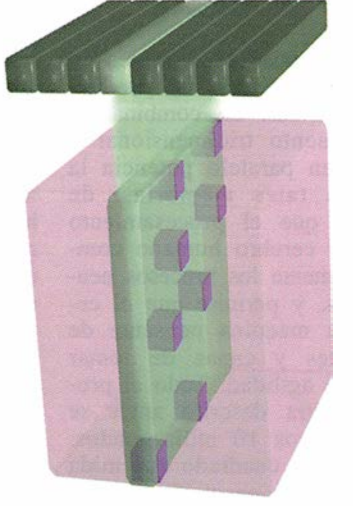
De los estados intermedios que se producen tras la exposición inicial de la bacteriorrodopsina a la luz, algunos pasan a adoptar estructuras insólitas cuando absorben energía procedente de un segundo haz de láser, en un proceso de arquitectura secuencial monofotónica. Se producen, por ejemplo, reacciones de ramificación de este tipo a partir del intermedio *O*, formándose *P* y *Q*. Estas estructuras las generan dos pulsos consecutivos de luz láser, primero verde y después roja. Aunque el estado *P* es bastante efímero, se relaja a una forma conocida por *Q*, que es estable durante períodos largos, incluso de algunos años. A causa de su prolongada estabilidad, el estado *Q* es de gran relevancia en la búsqueda de memorias no volátiles de alta densidad.

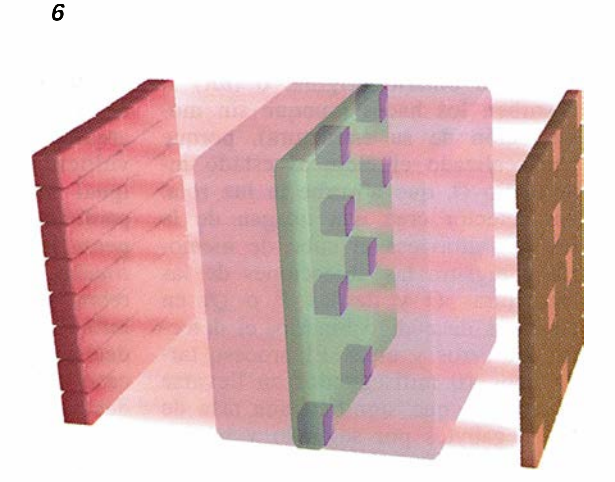
Los estados intermedios *P* y *Q*, que se forman en el proceso secuencial monofotónico, revisten particular utilidad para el procesamiento en paralelo. Al objeto de escribir datos en paralelo, nuestro método incorpora otra innovación: el almacenamiento tridimensional de datos. Un cubo de bacteriorrodopsina está rodeado por dos matrices de haces de láseres, dispuestas perpendicularmente. Una de las matrices de láser, de elementos sintonizados todos en luz verde, la llamada matriz de paginación, activa el fotociclo de la proteína en la sección transversal cuadrada que se seleccione en el interior del cubo (una "página"). Transcurridas algunas milésimas de segundo, cuando el número de estados intermedios *O* está próximo al máximo, se dispara la otra matriz de láseres, rojos, esta vez.

Esta segunda matriz está programada de forma que sólo ilumine la región del cuadrado activado en el que se habrán de escribir bits de datos, conmutando a la estructura *P* las moléculas que hay en ellas. Seguidamente, el intermedio *P* relaja su estructura, formando el estado *Q*, muy estable. Si asignamos la estructura *bR* al estado binario 0 y tanto la *P* como la *Q* al estado binario 1,

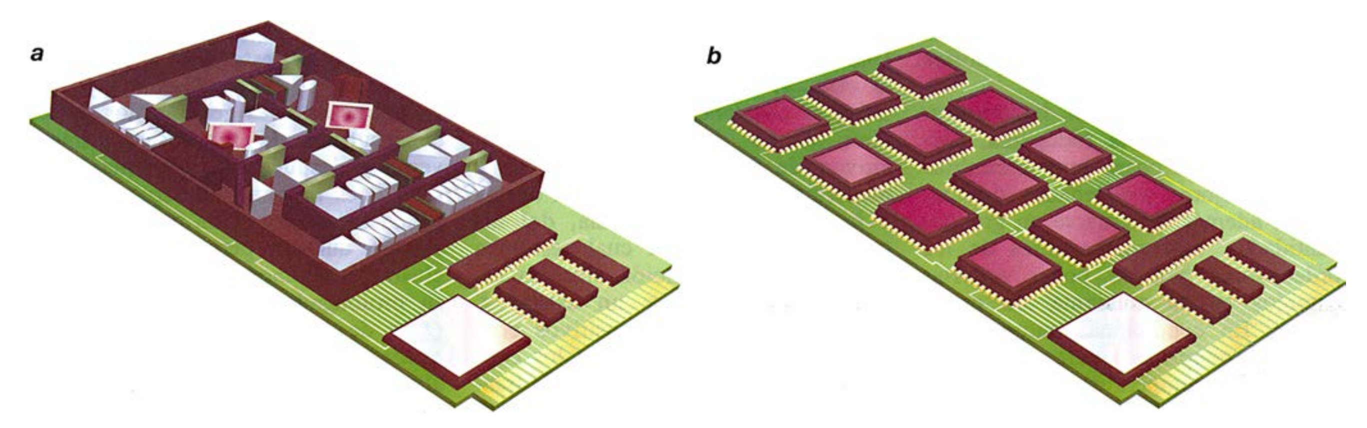
LECTURA DE DATOS







Las moléculas diana forman el estado *P* (*3*), relajándose en la estructura *Q* (*4*). La lectura desde la memoria de base proteínica comienza activando el plano con luz verde (*5*). Se disparan láseres rojos de baja intensidad. Las moléculas en el estado *bR* absorben la luz roja, mientras que las moléculas en el estado *P* o *Q* dejan pasar los bajos niveles luminosos. La configuración resultante de luz y oscuridad puede recogerse en un detector situado frente a la matriz de láser rojo (*6*).



4. LOS ORDENADORES del futuro podrían ser equipos híbridos, consistentes en tarjetas dotadas de proteínas (*púrpura*) y de semiconductores. Las que vemos aquí, no construidas aún, podrían proporcionar memoria asociativa (*a*) y memoria volu-

el proceso es análogo a la conmutación binaria que tiene lugar en las memorias de semiconductores o magnéticas. Dado que la matriz de láser puede activar moléculas en diversos lugares, cualquiera que sea su posición en la página iluminada elegida, es posible escribir simultáneamente —o sea, en paralelo— múltiples localizaciones de datos, a las que se denomina direcciones.

Nuestro sistema para la lectura de lo almacenado en la memoria —sea durante el procesamiento o durante la extracción de un resultado— se basa en la absorción selectiva de luz roja por el estado intermedio *O*. Para leer en paralelo múltiples bits de datos, se empieza igual que en el proceso de escritura. Primero, se dispara un haz verde de paginación contra el cuadrado de proteína que ha de leerse, iniciando el fotociclo normal de las moléculas en el estado *bR*. Al cabo de dos milisegundos, la matriz entera de láser se activa a una intensidad muy baja de luz roja. Las moléculas que se encuentran en el estado binario 1 (estados intermedios *P* y *Q*) no absorben los haces, ni cambian de estado.

Pero las moléculas que partían en el estado binario original 0 (*bR*) sí absorben los haces (aunque sin modificación de su estructura), porque han realizado el ciclo al estado intermedio *O*, que absorbe la luz roja. Un detector crea una imagen de la luz que atraviesa el cubo de memoria y registra las ubicaciones de las estructuras *O* y de las *P* o *Q*; en términos de código binario, el detector lee ceros y unos. El proceso tarda unos 10 milisegundos en llevarse a cabo, lo que significa una tasa de 10 megabytes por segundo y página de memoria.

Además de facilitar el procesamiento en paralelo, los cubos tridimensionales de bacteriorrodopsina proporcionan mucho más espacio de memoria que las memorias ópticas bidimensionales. Cierto sistema de memoria no biológica incorpora una delgada película de material magnético que se graba mediante un haz láser y se borra mediante un campo magnético. Estas memorias son bidimensionales, porque los datos se almacenan sobre la superficie del disco. Tales memorias bidimensionales tienen una capacidad de almacenamiento limitada a unos 100 millones de bits por centímetro cuadrado.

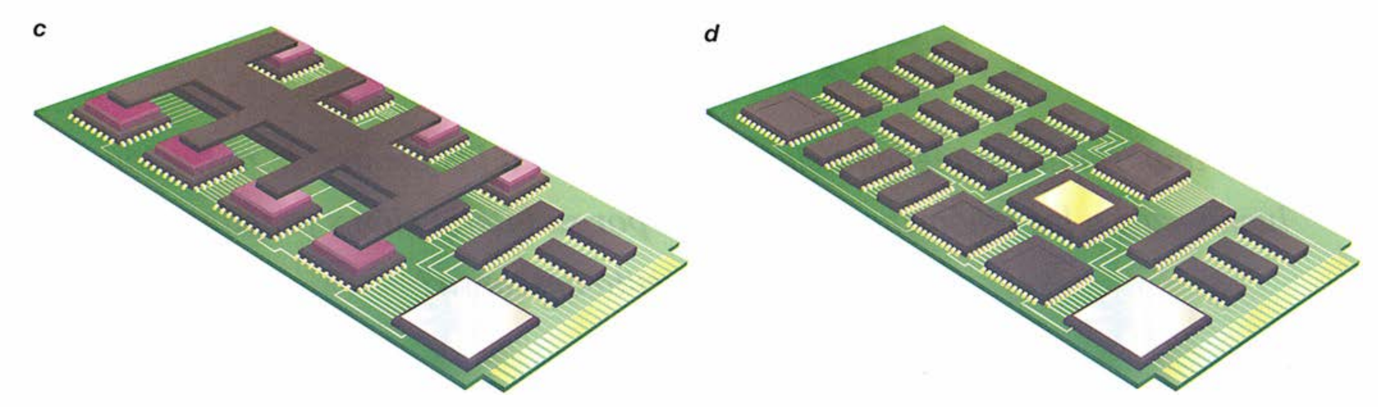
En contraste, las memorias ópticas tridimensionales pueden en teoría alcanzar densidades de almacenamiento de hasta un billón (10^{12}) de bits por centímetro cúbico. En la práctica, las limitaciones ópticas y de los dispositivos rebajan las densidades posibles para las memorias volumétricas. Pero parecen realizables capacidades de almacenamiento 300 veces superiores a las de los dispositivos bidimensionales. A corto plazo, el principal impacto de la bioelectrónica sobre los equipos informáticos corresponderá, en mi opinión, al campo de la memoria volumétrica.

La velocidad constituye también un importante beneficio de las memorias volumétricas. La combinación de almacenamiento tridimensional y arquitecturas en paralelo potencia la velocidad de tales memorias, de igual manera que el procesamiento paralelo en el cerebro humano compensa holgadamente los procesos neuronales, lentos, y permite que el cerebro sea una máquina pensante de reflejos veloces y capaz de tomar decisiones con agilidad. Todo el proceso de escritura descrito antes se desarrolla en unos 10 milisegundos. Si iluminamos un cuadrado que mida 1024 por 1024 bits en el interior del cubo de proteína, podemos grabar en la memoria 1.048.576 bits de datos, o sea, unos 105 kilobytes en un ciclo de 10 milisegundos. Tales valores equivalen a una velocidad global de escritura de 10 millones de caracteres por segundo, comparables a memorias de semiconductor lentas. Sin embargo, cada dispositivo de memoria puede acceder a más de un cubo de datos, y la velocidad de la memoria es proporcional al número de cubos que operan en paralelo. En consecuencia, una memoria de ocho cubos operaría mucho más rápidamente, a unos 80 millones de caracteres por segundo.

Para garantizar la exactitud de la lectura y la escritura, los cubos de memoria han de tener una composición uniforme; si en una región hay demasiadas moléculas, o excesivamente pocas, la información almacenada en ella sufrirá distorsión. La manufactura de los cubos en baja gravedad puede producir la homogeneidad necesaria para los dispositivos de memoria. En otro orden de cosas, las moléculas biológicas ofrecen esperanzas de servir de componentes para las memorias asociativas necesarias para redes neuronales y, en definitiva, para la inteligencia artificial.

En su modo de operar, las memorias asociativas difieren bastante de las memorias que predominan en las arquitecturas informáticas actuales. Las arquitecturas de aquel tipo toman un conjunto de datos, con frecuencia, en forma de una imagen, y exploran en su totalidad el banco de memoria hasta encontrar un conjunto de datos concordante. En algunos casos, si no encuentra una concordancia exacta el ordenador presenta la más parecida, efectuando una suerte de conjetura razonable de posible respuesta. Dado que el cerebro humano funciona en modalidad neuronal, asociativa, muchos creen que, para conseguir inteligencia artificial, serán necesarias memorias asociativas de gran capacidad.

Mi laboratorio ha desarrollado un dispositivo de memoria asociativa que se basa en las propiedades holográficas de las películas delgadas de bac-



métrica: unos 32 gigabytes de memoria permanente (*b*) y ocho gigabytes de memoria removible (*c*). Combinadas con una unidad central de procesamiento de semiconductor (*d*), estas tarjetas forman un ordenador completo de grandes capacidades.

teriorrodopsina. Los hologramas permiten el almacenamiento de imágenes múltiples en el mismo segmento de memoria, lo que posibilita el análisis simultáneo de vastos conjuntos de datos. El sistema de memoria está basado en el clásico diseño de Eung G. Paek y Demetri Psaltis. Hemos hallado que la bacteriorrodopsina ofrece ventajas bien caracterizadas frente a los cristales fotorrefractivos utilizados para fabricar estas memorias. Dado que la proteína es más sensible a la luz que los cristales inorgánicos, pueden emplearse niveles de iluminación más bajos. En consecuencia, para escribir y leer en la memoria hace falta menos energía, mejorando la velocidad de estos procesos. Además, la bacteriorrodopsina puede grabarse y leerse muchas veces más que los cristales, los cuales, tras repetidos ciclos de lectura-escritura, acusan fenómenos de fatiga.

Al tiempo que continúan los estudios de la bacteriorrodopsina, muchos laboratorios están explorando el valor de formas modificadas de la proteína para dispositivos informáticos. Concretamente se están investigando versiones de la proteína obtenidas por ingeniería genética, en las cuales un aminoácido reemplaza a otro con el fin de reforzar las propiedades necesarias para una determinada aplicación. Por ejemplo, por eliminación en la proteína de un aminoácido interno es posible prolongar la pervivencia del estado *M* en el fotociclo, como han demostrado Norbert Hampp y Christoph Bräuchle en colaboración con Oesterhelt.

Evidentemente, la meta última son los ordenadores biomoleculares. Pero la mayoría de los expertos consideran que el primer paso en el desarrollo de ordenadores de base proteínica habrá de ser la generación de sistemas híbridos que conjuguen las mejores características de las arquitecturas molecular y de semiconductores. En particular, la técnica híbrida, compuesta en parte por memoria de alta densidad y base proteínica, puede contribuir a resolver el pertinaz problema de la capacidad de la memoria.

A lo largo de los últimos diez años, la velocidad de los procesadores de ordenador se ha multiplicado casi por mil, mientras que las capacidades de los dispositivos de almacenamiento externo sólo aumentaron en un factor de 50. Por otra parte, la transferencia de datos en el seno del ordenador sigue constituyendo el principal cuello de botella que limita el rendimiento. El procesamiento en paralelo y las interconexiones mediante señales luminosas, acelerados ambos merced a ordenadores híbridos que saquen partido de la eficiente conmutación de moléculas biológicas, permiten el almacenamiento, la transferencia y la manipulación de ingentes cantidades de datos.

Con el propósito de explorar el valor de los ordenadores híbridos, mi laboratorio está diseñando uno que contiene cuatro tipos de unidades de memoria o de procesadores, denominados tarjetas. La tarjeta de la unidad central de procesamiento de este ordenador utilizará las técnicas tradicionales de semiconductores. Dos tarjetas contendrán memoria volumétrica de base proteínica, con una capacidad total en torno a 40 gigabytes. Una de estas tarjetas será una memoria de acceso aleatorio, permanente, sin partes móviles; la otra ofrecerá un almacenamiento de datos a largo plazo, más económica y removible. La cuarta tarjeta contendrá una memoria asociativa basada en películas de bacteriorrodopsina.

El ordenador híbrido que imaginamos sería sumamente versátil. Aprovechando las combinaciones de memoria descritas, el ordenador debería poder manejar grandes bancos de datos, efectuar simulaciones complejas o servir de plataforma excepcional para investigaciones de inteligencia artificial. Provista de cerca de un terabyte (10^{12} bytes) de memoria en cubos de bacteriorrodopsina, esta máquina podría manejar grandes bases de datos. La combinación de procesamiento por memoria asociativa con memoria volumétrica haría que la consulta a bases de datos fuera varios órdenes de magnitud más rápida de lo que es posible en la actualidad. Dado que este modelo híbrido puede operar como ordenador híbrido asociativo y neuronal, capaz de aprender y analizar datos de forma similar a como lo hace el cerebro humano, no cabe subestimar la posible importancia de los computadores híbridos en inteligencia artificial.

Aunque mi grupo y otros han tenido notable éxito en el desarrollo de memorias volumétricas y procesadores asociativos, se requiere ahondar más antes de que pueda construirse un ordenador híbrido operativo. En el camino conducente al desarrollo de un diseño potente y de precio razonable, puede que otras arquitecturas reemplacen muchos de los componentes físicos que hemos descrito. Confiamos, sin embargo, en que antes de ocho años habrá computadores híbridos de algún tipo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BACTERIORHODOPSIN: A BIOLOGICAL MATERIAL FOR INFORMATION PROCESSING. Dieter Oesterhelt, Christoph Bräuchle y Norbert Hampp en *Quarterly Reviews of Biophysics*, vol. 24, n.º 4, págs. 425-478; noviembre de 1991.

PROTEIN-BASED OPTICAL COMPUTING AND MEMORIES. Robert R. Birge en *Computer*, vol. 25, n.º 11, páginas 56-67; noviembre de 1992.

PROTEIN-BASED THREE-DIMENSIONAL MEMORY. Robert R. Birge en *American Scientist*, vol. 82, n.º 4, páginas 348-355; julio-agosto de 1994.

Coherencia óptica

Esta importante propiedad física está asociada a las fuentes de radiación luminosa y a los fenómenos producidos por su interacción y propagación. ¿Sobre qué fundamento descansa?

María Luisa Calvo Padilla

La luz desempeña un papel principal en nuestra existencia. Es un fiel mensajero que nos revela múltiples aspectos de la vida en el planeta y su entorno. Cuanto mejor conozcamos su naturaleza, mejor comprenderemos el universo del que formamos parte. Nos proponemos analizar aquí uno de los aspectos más sutiles de la luz: la información implícita que lleva sobre las fuentes que la generan. Nos interesará también su capacidad de interaccionar consigo misma al propagarse a partir de la fuente de emisión, dando lugar a los fenómenos de interferencia.

La luz nos informa acerca de la naturaleza de los obstáculos con los que interacciona cuando encuentra a su paso elementos materiales de muy diversa índole, tamaño y geometría, originando lo que se conoce como difracción por objetos rígidos.

Los fenómenos de interferencia y de difracción constituyen el fundamento de la formación de imágenes en instrumentos ópticos: telescopios, microscopios, cámaras fotográficas, etc. Aplicaciones importantes de estos fenómenos son también la espectroscopía como método de análisis espectral de fuentes de luz, tanto en su vertiente de espectroscopía interferencial como de espectroscopía por transformación de Fourier, que permite obtener el espectro de potencia de una fuente. Se diría que la luz encierra en su estructura una suerte de código del que pueden extraerse importantes datos acerca de su propia naturaleza y la estructura de la materia.

Los fenómenos de interferencia y difracción fundamentan los principios básicos de la holografía y sus ramas de aplicación más específicas, como la metrología y la interferometría holográfica. Estas técnicas se están ampliando a métodos interferométricos que hacen uso no de luz visible, sino de partículas elementales, entre los que cabe destacar la interferometría de neutrones, que origina nuevos campos de la física interconectados entre la óptica clásica y la física de partículas: la óptica de neutrones.

Si bien los primeros interferómetros de neutrones construidos en 1962 producían una baja calidad en la visibilidad de las franjas de interferencias, posteriores técnicas basadas en la reflexión de Bragg por cristales de silicio mejoraron bastante los resultados. Uno de estos experimentos, desarrollado en 1975 por el grupo de Samuel A. Werner, se fundamentaba en la puesta a punto de un dispositivo topológicamente análogo al interferómetro de Mach-Zender, donde se opera con un separador de haz. A grandes rasgos, consiste en hacer incidir un haz de neutrones sobre un cristal de silicio, que actúa de separador, de manera que la red cristalina debe reflejar este haz bajo un ángulo particular cuyo valor depende de la longitud de onda del haz de neutrones y de la distancia entre planos de la red cristalina. A este ángulo se le conoce como ángulo de Bragg. Trabajando en estas condiciones se refuerza la energía reflejada y mejoran notablemente las mediciones. Este y otros experimentos han puesto de manifiesto que las leyes que rigen la interacción de haces de neutrones son las mismas que las de los campos macroscópicos.

Mas, para entender bien estos métodos y experimentos obtenidos de la interacción de la luz con la materia, de la interacción de la luz consigo misma o con haces de partículas, hemos de conocer de antemano la naturaleza de la radiación y las consecuencias que de ella se derivan. Para ello hay que introducirse en el concepto de campo.

En mecánica clásica, todos los fenómenos que llevan asociada interacción de partículas se describen mediante campos de fuerza. Cuando una partícula actúa sobre una segunda, crea un campo; cualquier otra partícula que se encuentre en ese campo se verá sometida a la acción de una fuerza. Estamos hablando del concepto de campo clásico. En los fenómenos que describamos sobre interacción luz-luz y luz-materia no tendremos en cuenta los aspectos relativistas, según los cuales la interacción no puede darse en cualquier instante de tiempo. Exploraremos la naturaleza de los campos electromagnéticos *clásicos* para adentrarnos luego en algunas de sus características a la hora de analizar el origen, propagación e interacción de los campos de luz.

August Fresnel, físico francés, puso de manifiesto en 1814 la naturaleza ondulatoria y transversal de la luz mediante experimentos que producían interferencias, difracción y polarización. Para interpretar sus resultados, Fresnel supuso que estas ondas se mantenían en un medio imperceptible, el éter. Fresnel imaginó la luz a la manera de un vector que representara un desplazamiento (propagación) en este medio ideal. En el siglo XIX se suponía que el éter constituía un medio elástico, o fluido, donde se generaban y propagaban las vibraciones.

Contra la teoría del medio elástico operaba la naturaleza transversal de la luz, es decir, las vibraciones que genera son siempre perpendiculares a la dirección que marca el movimiento de las ondas. No existen ondas de luz longitudinales. Lo comprobó ya otro físico francés, Etienne-Louis Malus, en 1808. Malus observó que, si un haz de luz blanca incide con cierto ángulo sobre la superficie pulida de un vidrio, después de reflejada se convierte en luz plano polarizada, es decir, toda la luz vibra perpendicular

MARIA LUISA CALVO PADILLA enseña óptica en la Universidad Complutense de Madrid. Desde enero de 1993 trabaja también en el laboratorio de instrumentación espacial del Instituto Nacional de Tecnologías Aeronáuticas.

a la dirección del haz, como si estuviera contenida en un plano de polarización perpendicular a la dirección de avance.

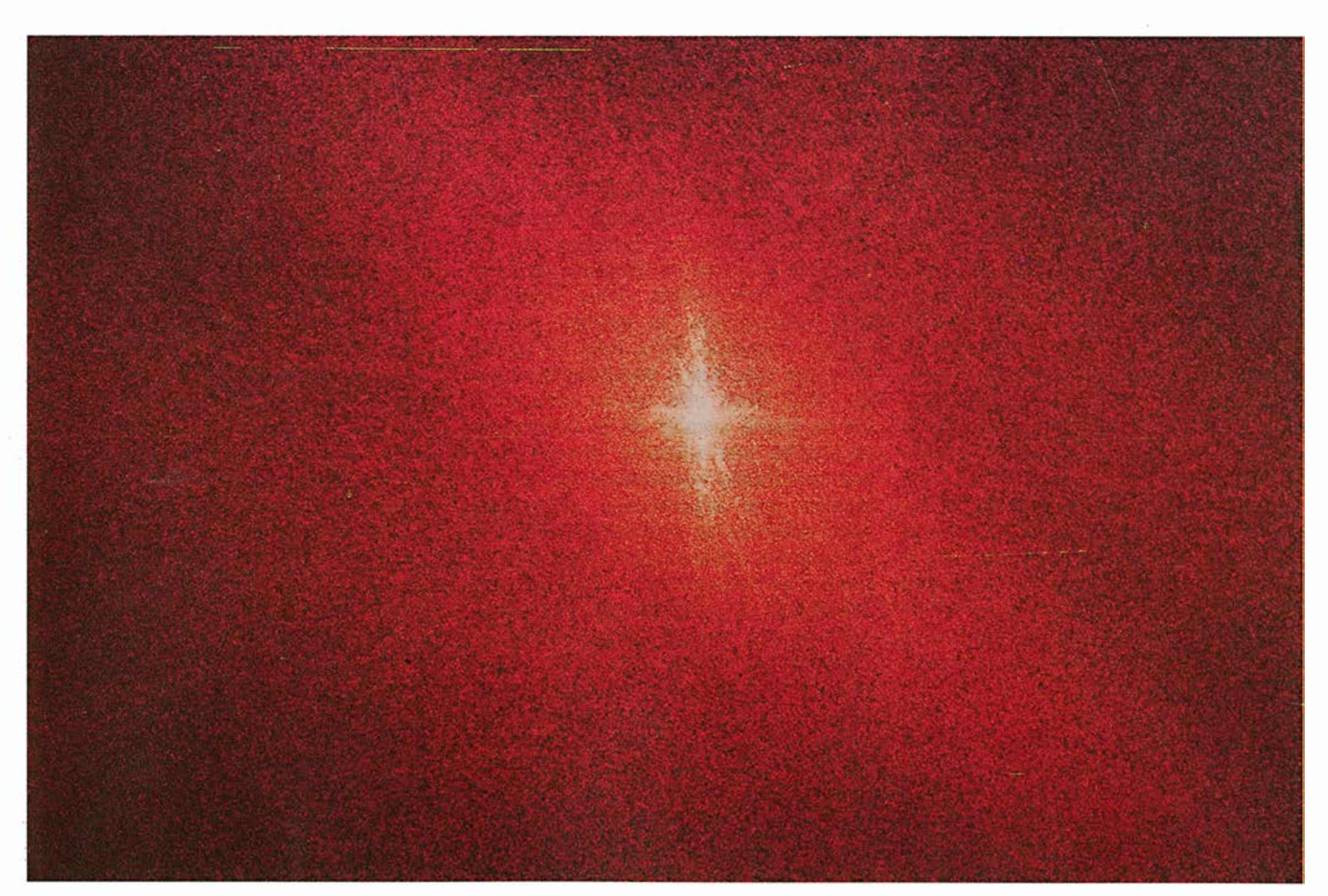
Pero hasta 1864 J. Clerk Maxwell no dio la primera explicación satisfactoria al proponer una teoría que presentaba un doble requerimiento: las vibraciones de la luz son estrictamente transversales y existe una conexión entre luz y electromagnetismo. Maxwell expresó los resultados de su trabajo teórico en cuatro ecuaciones, que llevan hoy su nombre. Su desarrollo estaba basado en los resultados de las investigaciones llevadas a cabo por Hans Christian Oersted, Michael Faraday y Joseph Henry en experimentos que demostraron la inducción electromagnética, que vincula la electricidad con el magnetismo.

La primera ecuación de Maxwell establece que un campo magnético puede ser inducido por la existencia de cargas libres (electrones) en movimiento. La segunda ecuación, equivalente y recíproca de la anterior, describe la inducción de una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético variable, fenómeno observado experimentalmente por Faraday (ley de inducción). La tercera ecuación expresa la ausencia de cargas eléctricas libres en el vacío; finalmente, la cuarta establece la imposibilidad de que haya polos magnéticos libres o monopolos.

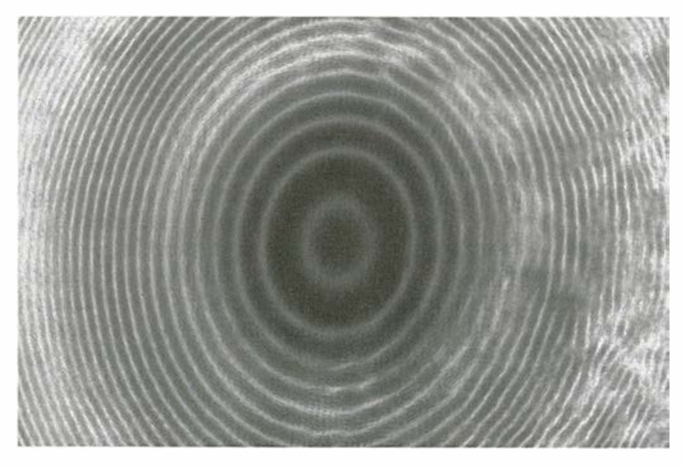
Las cuatro ecuaciones maxwellianas no dan directamente la magnitud del campo electromagnético, sino la proporción en que varía el campo eléctrico en las tres direcciones del espacio. En general, admitiremos que el campo electromagnético es la superposición de un campo eléctrico y un campo magnético. Estas ecuaciones fundamentales conducen a dos que describen la propagación, y en las cuales la velocidad de las ondas propagadas en el éter se calcula sucesivamente en términos de magnitudes eléctricas (unidades electrostáticas) y unidades electromagnéticas (basadas en el magnetismo). La determinación experimental de esta velocidad conduce al valor numérico c, que representa la velocidad de la luz en un medio con propiedades máximas de transmisión y mínimas de absorción, el vacío. Este resultado supone la confirmación de las ideas de Maxwell sobre la naturaleza electromagnética de la luz. A partir de estos experimentos las dos posibles naturalezas del éter se fundieron en un continuo; la electricidad, el magnetismo y la óptica se fundieron, a su vez, en una sola ciencia.

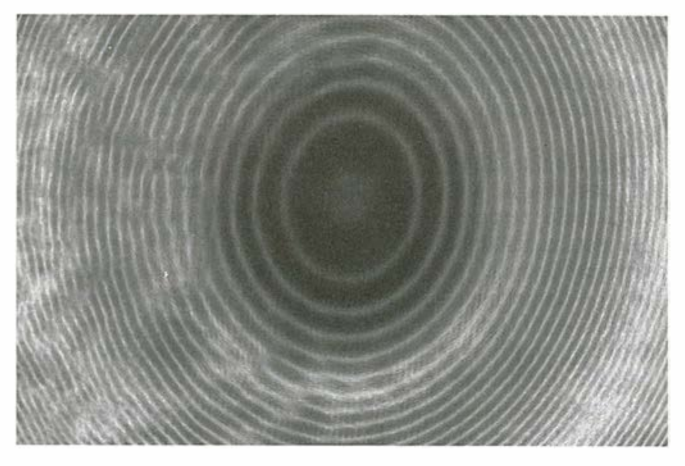
Las ecuaciones de Maxwell caracterizan la propagación de un campo óptico en el espacio libre, sin restricciones por lo que se refiere a las dimensiones idealmente infinitas del medio en el que se propaga. Pero si este medio tiene unas dimensiones y una geometría determinadas (por ejemplo, esférica, cilíndrica, etc.), hemos de introducir la condición de contorno.

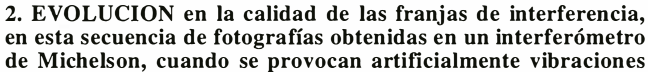
Si descomponemos idealmente el campo en dos direcciones, una perpendicular y otra tangencial a la superficie que marca la discontinuidad, la conservación del flujo de energía a través de la superficie requiere la conservación de ambas componentes. De esta manera añadimos al campo electromagnético una condición adicional, la de comportarse como un campo conservativo. Teóricamente, se tendría



1. MOTEADO LASER. Cuando observamos un fenómeno de difracción producido por la interacción de un haz láser de helio-neón con una diapositiva, provocamos un moteado láser. Este fenómeno, el granulado que cubre todo el fondo de la figura, se debe a la interacción múltiple del haz altamente coherente con las microdeformaciones de la superficie de la diapositiva. Ha ocurrido, en efecto, un fenómeno de dispersión múltiple aleatoria, esto es, un proceso estadístico originado por las condiciones de coherencia espacio-temporal de la fuente así como de la estructura del objeto.







2. EVOLUCION en la calidad de las franjas de interferencia, en esta secuencia de fotografías obtenidas en un interferómetro de Michelson, cuando se provocan artificialmente vibraciones mecánicas. El movimiento de toda la estructura, esto es, la suma de armónicos a distintas frecuencias, destruye las condiciones de coherencia. Al cesar las oscilaciones espurias, reapa-

aquí una descripción completa de la propagación de un campo clásico.

Queda, sin embargo, por considerar un factor importante. Los campos ópticos llevan asociadas frecuencias de oscilación muy altas (10^{14} hertz, o ciclos por segundo); significa ello que los detectores clásicos no pueden medir las magnitudes asociadas a los valores reales del campo eléctrico y el campo magnético. Para establecer una medida válida hemos de tomar un promedio temporal del vector de Poynting asociado al flujo de energía. (Este vector, que toma su nombre del físico Henry Poynting, define la dirección de propagación de la energía perpendicular al plano formado por el vector eléctrico y el vector magnético.) Este promedio debe tomarse en intervalos de tiempo grandes, comparados con los períodos de oscilación del campo óptico. Y se hace necesario establecer una relación entre el promedio temporal del vector de Poynting y la distribución de la intensidad asociada a un campo conservativo.

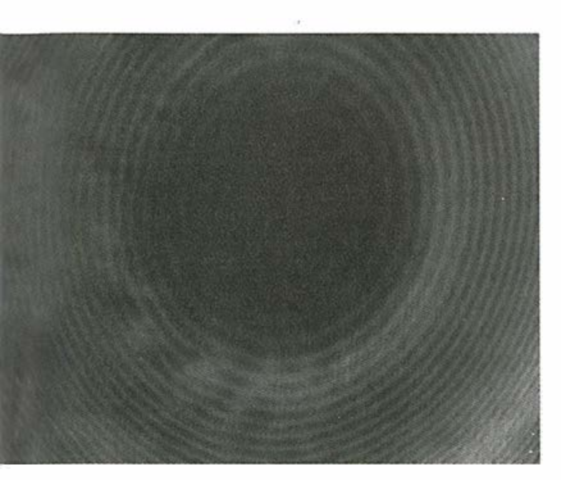
¿Cómo justificar físicamente la necesidad de operar con campos escalares? Al considerar un campo escalar se obvia un importante fenómeno asociado a la naturaleza vectorial de la luz: la polarización. En un tratamiento escalar se trabaja con una sola componente, ya sea del campo eléctrico o del magnético. Por ejemplo, si de las tres componentes del vector eléctrico **E** para las tres direcciones del espacio (E_x, E_y y E_z) tomamos E_x, quiere decir que la energía del campo fluye en un plano perpendicular a la dirección *x*. Fuera de ese plano no habrá radiación o flujo de energía. La aplicación de una teoría escalar simplifica considerablemente la complejidad de trabajar con vectores de tres componentes. Conduce, además, a interesantes resultados, válidos para explicar fenómenos de interacción de radiación. En 1970, Arvind Marathay y George Parrent analizaron en un interesante trabajo el uso de la teoría escalar en óptica. Demostraron que la justificación de una teoría escalar para la propagación del campo electromagnético guarda relación directa con el concepto de medida. Así, la cantidad observable en un fenómeno óptico es la irradiancia (densidad de energía por unidad de superficie), una magnitud escalar.

Se puede obtener una descripción completa de fenómenos de difracción, interferencia y propagación con una teoría escalar en términos de magnitudes observables. Para justificar esta descripción, se supone que el campo vectorial, **E**(t), sólo se identifica con una única componente escalar *V*(t). Pero ello no es suficiente. En la teoría escalar de la coherencia se define una relación directa entre las cantidades cuadráticas de las variables que representan el campo. Esta relación se establece como una correlación cruzada entre dos componentes vectoriales del campo electromagnético. Al resultado de esta operación se le conoce como matriz de coherencia mutua. Sus cuatro elementos son magnitudes escalares independientes que pueden ser medidas físicamente, ya que son proporcionales a la irradiancia del campo electromagnético. De esta forma, el uso de la teoría escalar se puede justificar diseñando experimentos en los cuales los fenómenos de interacción de la radiación no induzcan mezclas de componentes del campo vectorial **E**(t) y en los cuales no se hace necesario describir la polarización del campo. La representación más sencilla de *V*(t) es una función sinusoidal o cosinusoidal que denota su condición de campo oscilante como onda periódica en el tiempo y en el espacio. Su correspondiente representación compleja es una función exponencial.

La representación tanto vectorial como escalar de una onda está sujeta a dos parámetros fundamentales: la amplitud y la fase. Podemos asociar el concepto de amplitud a una función que da cuenta de la energía que transporta la onda. Matemáticamente, el módulo al cuadrado de la amplitud compleja corresponde a la intensidad, que es la magnitud escalar que registran los detectores de radiación. Estos valores de la energía se miden en unidades radiométricas derivadas de unidades eléctricas, expresadas en watts por metro cuadrado.

Si volvemos a la representación compleja de la onda escalar y tomamos el módulo cuadrado, observamos que se ha producido una pérdida de información acerca de los parámetros que la caracterizan. Aunque se obtiene la intensidad, se ha perdido la información relativa a la fase, es decir, a la naturaleza oscilante de la onda. Por tanto, los detectores de radiación habituales (sistema visual de vertebrados e invertebrados, fotomultiplicadores, placas fotográficas y toda la gama de detectores que basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico) son detectores cuadráticos: no dan cuenta de las oscilaciones del campo emitido por una fuente, sino sólo del porcentaje de energía transportado.

Para cuantificar la fase no basta con utilizar un fenómeno de propagación. Hay que realizar una operación más, la suma de dos ondas al menos; es lo que conocemos como fenómenos de superposición de ondas. Imaginemos una piscina olímpica donde se disponen a saltar dos



recen las franjas. En general, las mesas de trabajo para interferometría láser son antivibratorias.

nadadores. El agua de la piscina forma una superficie sin ninguna perturbación. En un primer cuadro, los nadadores saltan y llegan al agua en el mismo instante. Comienzan a nadar a braza formando cada uno surcos o perturbaciones sobre la superficie del agua, como ondas esféricas. Los deportistas crean perturbaciones síncronas, y ambas están en fase. Si observamos la superficie del agua, las dos ondas al superponerse forman depresiones (superposición destructiva) y puntos máximos de avance de la perturbación (superposición constructiva): estamos ante un fenómeno interferencial. La onda resultante se distribuye en mínimos (puntos donde la energía se anula) y máximos (puntos donde la energía se refuerza).

Supongamos un segundo cuadro. De nuevo sobre la superficie perfecta del agua se van a lanzar los nadadores. Pero ahora no lo hacen en el mismo instante; uno de ellos salta décimas de segundo antes que el otro. Las perturbaciones que forman ambos nadadores son asíncronas, es decir, no hay coincidencia en las fases, y ya no observaremos el fenómeno de máximos y mínimos, sino unas figuras distorsionadas. Al no haber coincidencia temporal en las fases, no se producen las interferencias.

Sustituyamos a los deportistas por átomos de una fuente, de modo que cada uno emita energía en la forma de un fotón o cuanto de luz a una determinada frecuencia. Si el conjunto de átomos emite en fase y a la misma frecuencia, es decir, síncronamente, obtendremos una fuente macroscópica perfectamente monocromática y con un grado de coherencia máximo (máximo reforzamiento de la energía).

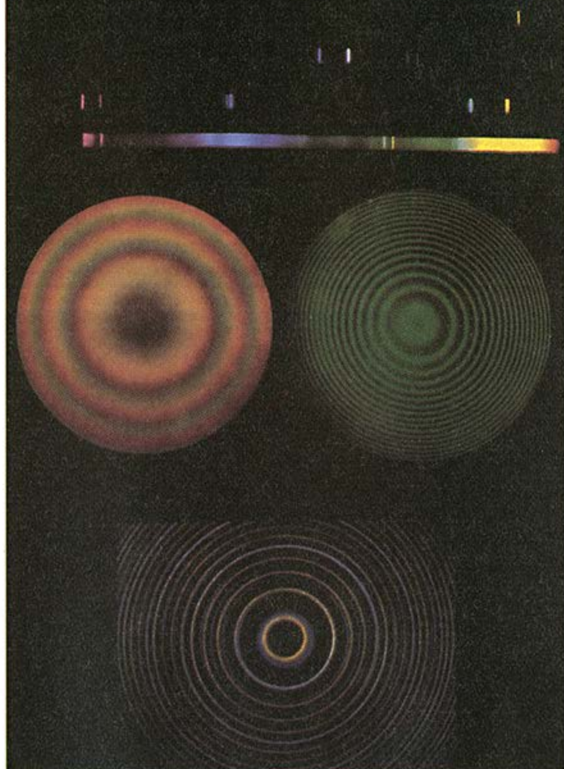
En la naturaleza no existen fuentes de luz capaces de emitir radiación con una sincronización perfecta. En las estrellas, por ejemplo, la asincronía de su emisión de radiación es tal, que deberíamos considerarlas fuentes que emiten radiación incoherentemente. La radiación solar se caracteriza por su alto grado de incoherencia.

De entre las fuentes disponibles, sólo hay una que se aproxima mucho al comportamiento síncrono, y es la fuente láser. Diremos de ella que posee un grado de coherencia máximo. Aunque su monocromaticidad tampoco es perfecta, sus átomos emiten en una banda de frecuencias espectrales muy estrecha; la anchura media de su espectro es casi inapreciable, por lo que su monocromaticidad también es máxima. Vemos, pues, que un método de cuantificar la fase se basa en la medida del grado de coherencia de las fuentes que emiten la radiación. En términos más rigurosos, la física matemática enuncia que la fase pertenece al espacio de los números y es, por tanto, un observable, aunque no en valor absoluto sino relativo, como diferencia de fases.

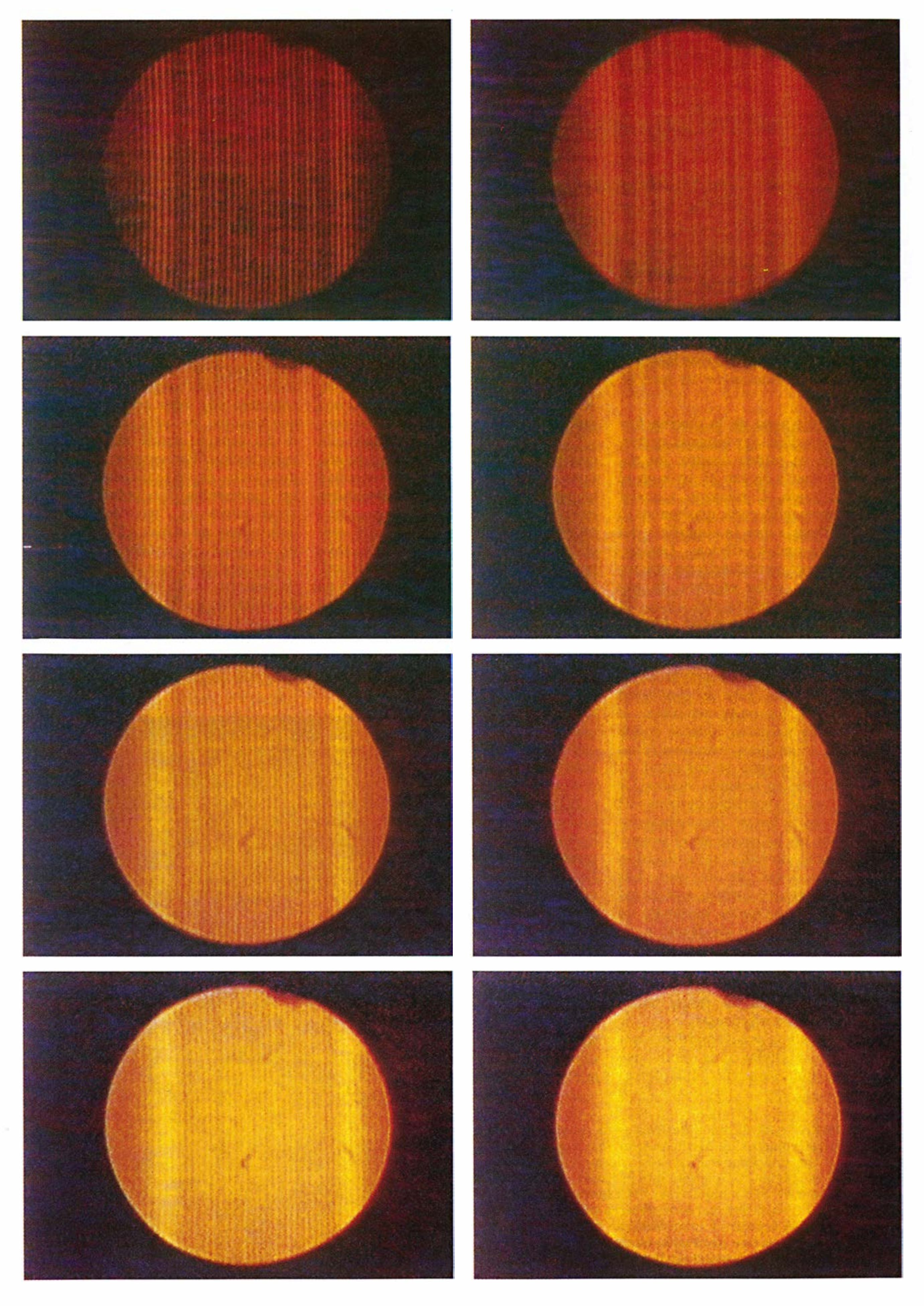
Para tener una idea intuitiva de observable se hace necesario recurrir a una escala de tiempos. Imaginemos un fenómeno de superposición de varios trenes de onda que emiten a distintas frecuencias. El tren de ondas resultante aparecería como periódico para un observador cuya escala de tiempos fuera mayor que un período de la oscilación. Pero si la observación se hace en una escala de tiempos inferior al período, el observador no podrá predecir en el tiempo el comportamiento de este tren de ondas. Se entiende, pues, que el observable tenga la particularidad de poder ser predeterminado en el tiempo; es decir, podemos predecir su evolución temporal.

El comportamiento matemático de la fase dista mucho de ser trivial. Se requieren unas herramientas matemáticas que presenten determinadas propiedades, puesto que se trata de representar una magnitud compleja. Según estableció E. C. George Sudarshan, podemos representar la fase como una función de distribución de probabilidades, por una distribución gaussiana por ejemplo. La representación de una magnitud en el plano complejo nos lleva a hablar del fasor, que describe, en cada instante, el punto del espacio donde se encuentra la perturbación. Por ejemplo, el fasor de una onda exponencial avanza como un "sacacorchos", o podría materializarse como un "muelle", capaz de deformarse en el tiempo dependiendo de su grado de coherencia.

La magnitud que define el grado de coherencia de una fuente emisora de radiación es un escalar análogo al campo vectorial en términos de observables. La correlación temporal de dos campos vectoriales medida en un intervalo finito de tiempo se represen-



3. COMPARACION de tipos de franjas de interferencias producidas por un interferómetro de Michelson (*arriba*) con luz blanca, a la izquierda, y con una lámpara de vapor de mercurio, a la derecha. La visibilidad es máxima ya que sólo está asociada a una longitud de onda (línea lambda, de 550 nanómetros) del espectro de la fuente de mercurio. En las franjas inferiores se observa un mayor detalle en la estructura fina del espectro y la anchura de banda. Ello es debido a que las interferencias se han producido en un interferómetro de Fabry-Perot. En general, la visibilidad de las franjas es proporcional al grado de coherencia de la fuente.



ta matricialmente como la matriz de coherencia. La llamada función de coherencia mutua es la traza (o diagonal) de esta matriz. Así, en experimentos que conllevan correlación de campos ópticos, el observable está relacionado con esta función, la cual a su vez está directamente relacionada con la medida de la irradiancia. La función de coherencia mutua es, pues, la magnitud escalar que conecta con el campo vectorial. No deja de ser, sin embargo, un hecho sorprendente el que, si bien la luz tiene naturaleza vectorial, el tratamiento de algunos fenómenos ópticos considerando la luz como campo escalar conduce a respuestas correctas con respecto a las medidas de irradiancia.

No es fácil establecer una relación o identificar la magnitud escalar utilizada en la descripción de estos fenómenos con las componentes del vector eléctrico **E**(t). Para que exista tal identificación se requiere que los fenómenos ópticos no presenten cambios en los estados de polarización. Por ejemplo, la descripción propuesta no sería válida para fenómenos de difracción de luz por un cristal en cuya estructura haya realojamiento de iones al paso de la radiación y consecuentemente variaciones en los planos de polarización de la luz modulada dentro del cristal.

En resumen, puede establecerse una teoría escalar para describir fenómenos ópticos de difracción, interferencia y propagación, mediante la factorización de la función de coherencia mutua. Pero dicha factorización implica una monocromaticidad total de la fuente, algo imposible en física. Habrá, pues, que introducir artificialmente algunas condiciones de incoherencia.

Desde los comienzos del estudio de las propiedades matemáticas de la función de coherencia mutua se vio el interés de analizar la situación en que ésta puede representarse como producto de dos funciones independientes. En 1961, Leonard Mandel estableció las condiciones de validez de dicha representación. Y así se comprobó que, a partir de dos haces de luz "espectralmente puros" (con función de coherencia reducible), se obtenía otro haz "espectralmente impuro" (con función de coherencia no reducible). En efecto, tomemos dos haces de luz con idénticas propiedades. Si los recombinamos o superponemos para producir interferencias, y el haz resultante reproduce las características de los espectros individuales de ambos haces sin recombinar, diremos que el campo resultante es espectralmente puro. Si no se cumple esta propiedad, entonces se comportan como espectralmente impuros.

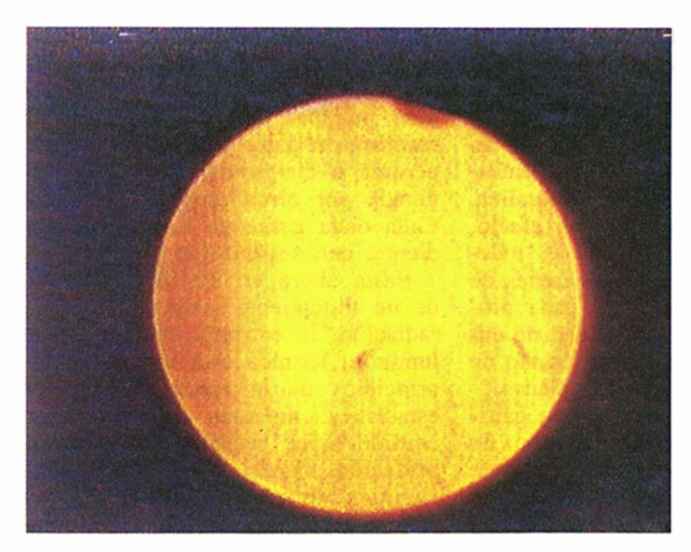
Desde el punto de vista matemático, la función que representa la correlación entre dos campos cumple unas propiedades particulares, si hay pureza espectral. Para describir la pureza consideraremos un producto de dos funciones. Una función indica el grado de correlación para la fuente luminosa con una anchura de banda muy estrecha (fuente cuasi-monocromática), y está asociada a la coherencia temporal. La otra función, que multiplica a la anterior, constituye una función de correlación que representa el grado de correlación para un intervalo de tiempo dado (asociada a la coherencia espacial). En estas condiciones se dice que la función de correlación es reducible.

Podemos evaluar el grado de pureza espectral realizando mediciones en un espectroscopio. El análisis de las franjas aisladas nos dará una idea de la composición espectral de la luz de la fuente en estudio. Si los campos que genera son impuros, en cada franja se observará una distribución de colores. Esta distribución cromática se repetirá periódicamente y creará una figura de interferencia donde aparece un mapa cromático repetitivo, que no debe confundirse con las franjas coloreadas que se observan al descomponerse la luz blanca por la dispersión. Lo que define a un campo espectralmente impuro es la periodicidad con que aparecen las franjas coloreadas.

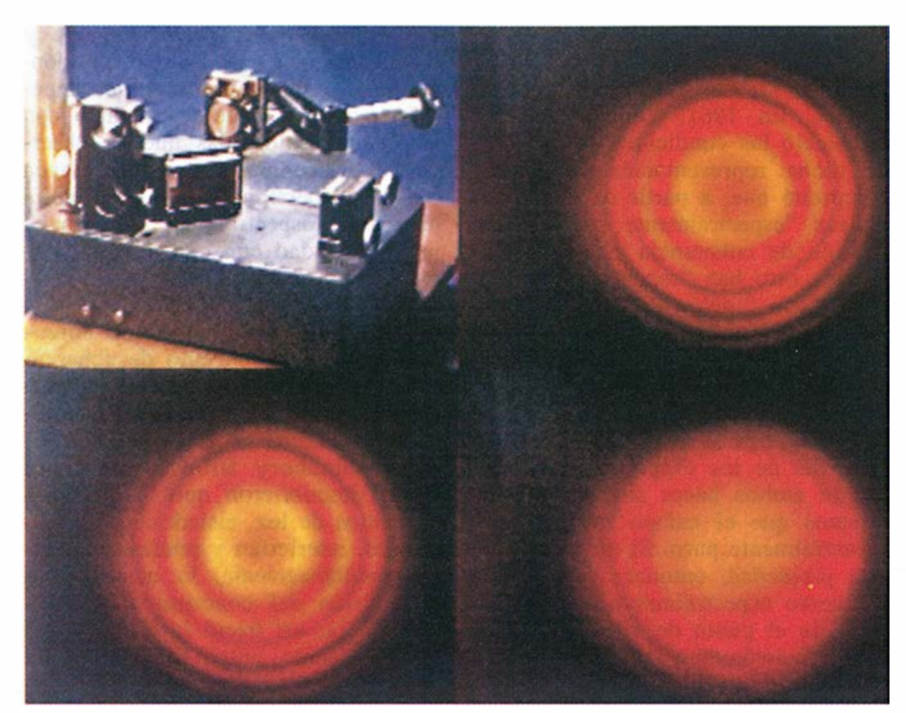
Hasta aquí, hemos venido entendiendo el concepto de coherencia vinculado a la capacidad de una fuente de radiación para producir fenómenos interferenciales. Pero ya en 1956 Handbury Brown y Richard Twiss descubrieron que los fotones, o cuantos de luz, aislados e independientes, interferían y podían detectarse simultáneamente, lo que llevó a la revisión del concepto clásico de coherencia; así nació la idea de que la correlación entre fotones es de naturaleza estadística, lo que posibilitaba medir la correlación entre fluctuaciones de la intensidad entre dos puntos diferentes del espacio.

¿Con qué probabilidad se localizan los fotones que interaccionan en el espacio y en el tiempo? ¿Hasta qué grado sabemos que el fenómeno será observable? La naturaleza dual de la luz como onda-corpúsculo nos recuerda que existe una relación de indeterminación entre las imprecisiones asociadas al número de fotones y a la fase de la onda electromagnética. En ese marco cuántico, la coherencia óptica es el conjunto de propiedades de correlación estadística entre los elementos de los campo ópticos.

La primera comprobación llevada a cabo por Brown y Twiss encontró interesantes aplicaciones en astrofísica y radioastronomía. Más tarde, desarrollaron el interferómetro estelar de intensidad. Los gigantescos reflectores instalados en Narrabri, en Nueva Gales del Sur, captaron señales de Sirio. Se obtuvo un valor para el diámetro



4. SECUENCIA DE FRANJAS de interferencia, obtenida en un interferómetro que opera por división del frente de ondas. En ellas se observa otro fenómeno de interés para la cuantificación de la coherencia de una fuente: su grado de coherencia espacial. Para realizar el experimento, se sitúa delante de la fuente (lámpara de sodio) un rendija estrecha de anchura variable. A continuación, el biprisma divide la luz en dos frentes que, al superponerse, dan lugar a las interferencias. Si ahora vamos abriendo progresivamente la rendija se observa en las siguientes que disminuye la visibilidad. Si seguimos abriendo la rendija llegará un momento en que la visibilidad es nula (no hay franjas), pues habremos llegado a una anchura tal, que la fuente ha perdido su grado de coherencia espacial. Cuanto más puntual sea la fuente, mayor será la visibilidad de las franjas de interferencia que se producen. El único cero de visibilidad corresponde a la última observación. Al ser la fuente cuasi-monocromática no se obtienen mínimos intermedios de visibilidad cero. En este experimento, y en el de la figura 5, nos ha ayudado Alberto Varela Vargas.



5. LONGITUD FINITA de los trenes de onda luminosos emitidos por una fuente; en este caso se trata de una lámpara de sodio a baja presión que emite con un espectro cuya línea espectral más energética es de 589 nanómetros, y que corresponde al doblete amarillo anaranjado. El interferómetro de Michelson (*arriba, a la izquierda*) tiene un tornillo micrométrico que actúa sobre uno de los espejos. En la posición inicial, cuando los caminos ópticos recorridos entre los dos brazos del interferómetro están compensados, la visibilidad de las franjas es máxima. Si desplazamos el espejo móvil por medio del tornillo, se observa una disminución progresiva en la visibilidad de las franjas hasta una posición entre los espejos para la cual la visibilidad de las franjas se hace cero.

angular de Sirio que fue estimado en $6{,}9 \times 10^{-3}$ segundos de arco. Desde el punto de vista del fenómeno de la correlación entre campos ópticos, este experimento puso de manifiesto la posibilidad de alcanzar correlaciones de orden superior. La correlación entre intensidades origina una estadística entre campos de orden superior a dos.

La correlación clásica de segundo orden, definida en términos de la función de coherencia mutua, describe efectos que dependen de correlaciones entre campos en dos puntos espacio-temporales. Si la correlación es de orden N, los efectos se describen en N puntos espacio-temporales, y se necesitará un número elevado de fotodetectores. La intensidad o corriente a la salida del correlador será proporcional a la probabilidad de detección coincidente de N fotones por los N fotodetectores en instantes de tiempo correlativos. Una correlación de orden superior pone de manifiesto las rápidas fluctuaciones de la intensidad. En el experimento de Narrabri, las fluctuaciones de la intensidad eran proporcionales a una correlación de cuarto orden, y pudieron medirse con dos fotodetectores e instalando un retardador de tiempos sobre uno de los brazos del interferómetro.

El experimento con Sirio reveló que la recepción de luz incoherente por dos detectores independientes mostraba una correlación en el espacio y en el tiempo, y podía describirse como un fenómeno de interferencia. Brown y Twiss describieron esta correlación de cuarto orden para distintos instantes de tiempo y distintos puntos del espacio analizando la correlación de la fotocorriente emitida por los detectores de luz. En 1954 Robert Dicke establecía una descripción paralela a la anterior, al señalar que los átomos de un gas excitado deben abordarse aislados, sometidos cada uno de ellos a las leyes de la mecánica cuántica. Así demostró la existencia de correlación angular en la distribución de los fotones emitidos por el gas en una fuente térmica. Las fuentes de radiación, en efecto, quedan caracterizadas por la independencia estadística de los trenes de onda emitidos a partir de cada proceso atómico. La probabilidad de encontrar el sistema en cierto estado de radiación sigue una ley de Gauss.

Tales fuentes de distribución gaussiana son estacionarias. Dicho de otro modo, nuestro conocimiento de las mismas no depende del origen de tiempos elegido al realizar una observación o detectar la radiación que emiten en un proceso de correlación, sino sólo de la diferencia entre pares de instantes.

Por ser estacionarias y hallarse sometidas las fuentes naturales de radiación óptica a fluctuaciones muy rápidas, la correlación entre campos acontece en un tiempo de detección brevísimo, inferior incluso al tiempo de respuesta mínimo de un detector clásico. Estos detectores miden valores medios de emisión, lo que obliga a realizar múltiples medidas correspondientes al mismo experimento, es decir, a la misma distribución, para alcanzar cierto grado de certeza. Se trata de conseguir una media de conjunto, que en el caso particular de campos estacionarios puede sustituirse por medidas tomadas en intervalos de tiempo fijos.

La descripción clásica de la coherencia está, pues, ligada a la naturaleza de las fuentes y a los instrumentos de medida utilizados. Pero las fuentes de radiación que generan campos ópticos clásicos son fuentes térmicas, sujetas a las leyes de la termodinámica, en cuyo seno nace la noción de entropía de la radiación. Podemos admitir que la entropía del haz resultante después de la superposición es la suma de las entropías de los dos haces que se han recombinado. Sin embargo, esto no es absolutamente cierto, ya que los haces de luz no son total sino parcialmente coherentes y, por ende, sólo parcialmente se correlacionan.

Para entenderlo mejor, imaginemos una red de difracción formada por un número muy elevado de trazos infinitamente estrechos, capaz de difractar la luz y descomponerla en un gran número de ondas difractadas en todas las direcciones del espacio. La entropía de las ondas difractadas será igual a la entropía del haz que ha incidido en la red antes de difractarse. Aquí, las ondas difractadas están totalmente correlacionadas. La difracción por una red de trazos es un fenómeno reversible, mientras no haya pérdida o disipación de energía originada por otros procesos distintos. Cada onda emite de forma independiente, con su entropía propia.

Hasta ahora no nos hemos salido de un tratamiento semiclásico de la radiación: la entropía de una fuente luminosa térmica está basada en los principios de la mecánica cuántica estadística, mientras que el campo emitido sigue recibiendo una interpretación clásica. Una descripción cuántica abordaría la fuente y el campo desde la perspectiva del com-

Variación de la visibilidad de las franjas con la anchura de la fuente

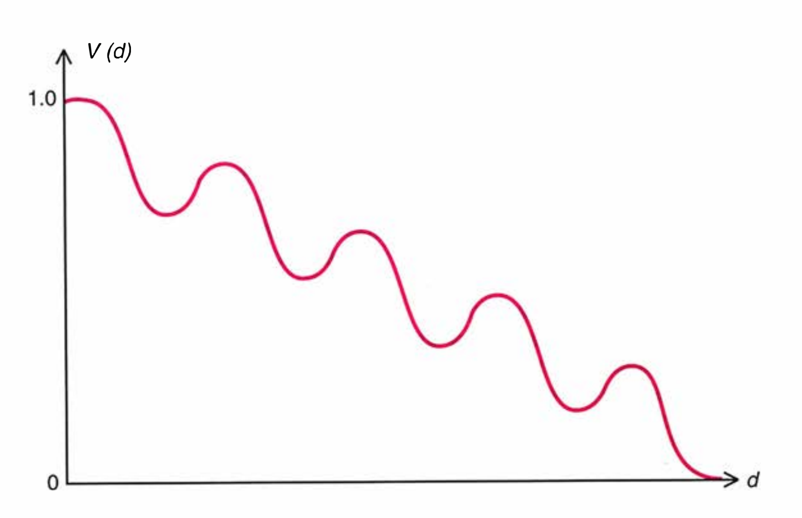
En el gráfico inferior, simbolizamos con $V(d)$ la variación de la visibilidad y con d, la anchura de la rendija. Los valores ilustrados corresponden al experimento de la figura 5. De forma aproximada, suponiendo monocromaticidad máxima, esta función se puede ajustar a la expresión:

$$V(d) = \left| \frac{\text{sen}\,(kr)}{kr} \right|$$

siendo : $k = 2 \times \pi/\lambda$, $V(d)$ es función de diferencia de coordenadas de posición:

$$r = \frac{d\,(x_1 - x_2)}{z}$$

siendo $x_1 - x_2$ la distancia entre las dos fuentes virtuales producidas por el biprisma; z, la distancia desde la fuente al plano de observación; r, una coordenada de posición reducida, y k, el módulo del vector de onda. Sépase, pues, que el producto kr es adimensional. Un grado de coherencia espacial que tiene la dependencia en r observada obedece las leyes de escala (factor de escala).



Ejemplos de fuentes que satisfacen esta ley son las fuentes planas, las secundarias (éste es el caso del experimento), las cuasi-homogéneas.

portamiento aislado de cada átomo emisor y cada fotón radiactivo.

De la simbiosis entre la óptica clásica y la física cuántica emergió la óptica cuántica. En la descripción cuántica de la coherencia óptica se aplican los principios de la teoría cuántica de campos. La cuantificación del campo electromagnético se puede establecer considerando que las amplitudes clásicas asociadas se comportan como operadores que siguen unas reglas de conmutación, tal como estableció Louis de Broglie en 1939. El estado estadístico de un campo de radiación define un operador. Cada operador representa un estado excitado de un átomo fuente, con una probabilidad de transición de un estado inicial a un cierto estado final no conocido. Las medidas efectuadas se realizan sobre un operador densidad. La función de correlación cuántica se expresa según este operador afectado por los operadores propios del campo cuantificado. Su significado físico es la tasa de recuento de electrones localizados en puntos del espacio y en instantes de tiempo arbitrarios. Representa, pues, la probabilidad de detección simultánea y asegura la coincidencia máxima de la detección de fotones en todos los puntos del campo.

¿Cómo establecer un principio de correspondencia entre las descripciones clásica y cuántica? Tomemos la función de correlación cuántica. Para $N = 1$ la función de correlación cuántica representa la correlación entre fotones obtenidos a partir de electrones libres. Estos fotoelectrones forman una corriente medible en un detector clásico, y, así, para $N = 1$ hay equivalencia. En el experimento de Brown y Twiss la correlación tiene un orden N mayor que 1. La detección tiene lugar en dos fotodetectores que producen dos corrientes independientes. La corriente total es el producto de ambas corrientes en instantes de tiempo afectados de un retardo adicional. Esta es la operación que se realiza en el correlador del dispositivo experimental.

El grado de coherencia o grado de correlación está expresado aquí como la diferencia entre la intensidad instantánea y la intensidad total que sale del correlador y que puede definirse en términos de la diferencia entre la función de correlación cuántica de orden $N = 2$ y la de orden $N = 1$ elevada al cuadrado. Para observar este fenómeno, es necesario que el tiempo de resolución de cada detector sea inferior al tiempo de coherencia del campo de radiación que proviene, en este caso, de una estrella. Se trata, en realidad, de un excedente de correlación estadística con respecto a la correlación "al azar".

A partir del principio de correspondencia mecánico-cuántico, según el cual la teoría clásica es macroscópicamente correcta y la teoría cuántica debe tender asintóticamente hacia la teoría clásica en el límite para números cuánticos elevados, se puede establecer que, en general, no existe correspondencia directa entre los estados clásicos y los cuánticos.

El desarrollo de nuevas fuentes láser de alta potencia, su diversidad en las formas de emisión, rangos de frecuencias y resolución, junto con el perfeccionamiento de nuevos detectores ultrarrápidos y estables, hacen prever la posibilidad de descubrir nuevos efectos asociados a la coherencia de las fuentes de luz. Ello obligará a una revisión de este principio de correspondencia estableciendo nuevas equivalencias entre las descripciones clásica y cuántica y produciendo un conocimiento más profundo de la naturaleza de los campos de luz.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THEORY OF PARTIAL COHERENCE. Mark J. Beran y George B. Parrent Jr., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Prentice Hall, Inc., 1974.

THE INTENSITY INTERFEROMETER. R. Hanbury Brown FRS. Taylor and Francis Ltd., Londres, 1974.

INTERNATIONAL TRENDS IN OPTICS. Dirigido por Joseph W. Goodman. Academic Press, Inc., Nueva York, 1991.

Degradación del suelo en la Grecia antigua

La arquelogía y la geología nos demuestran que los antiguos, lejos de vivir en armonía con su entorno, esquilmaban la tierra

Curtis N. Runnels

El paisaje griego seduce, en su desolación, a quienes lo contemplan. Durante miles de años, nativos y viajeros han cantado las alabanzas de esta nación, famosa por sus civilizaciones de la edad del Bronce y el desarrollo cultural de su pueblo en la época clásica. Pero, ¿es la campiña que vemos resultado exclusivo de la actuación del clima o tuvo el hombre su parte por clareo de bosques y fomento de la erosión del suelo?

La arqueología está cambiando la opinión, largo tiempo mantenida, sobre el efecto de la agricultura en el suelo peninsular. Las pruebas hablan de episodios de deforestación y erosión catastrófica de la tierra durante los últimos 8000 años. Muchos sostienen ahora que son consecuencia de una historia dilatada de uso y abuso del suelo. Esta nueva perspectiva de los asentamientos humanos y su impacto sobre el entorno contrasta notablemente con la visión de los románticos del siglo XIX, quienes consideraban a los griegos de la antigüedad prudentes administradores de una tierra que creían repleta de dioses.

Cierto es que persiste la idea generalizada según la cual las prácticas anticonservacionistas de la moderna civilización constituyen un fenómeno novedoso. No faltan en los periódicos voces que proclaman una vuelta al respeto equilibrado y reverencial que, se da por supuesto, tenían nuestros antepasados por el mundo natural. El fantástico Jardín del Edén con que lucubra la civilización occidental vino precedido en la antigüedad clásica por la creencia en la edad de Oro: época, por desgracia hoy perdida, en la que, se decía, los seres humanos vivían en plácida armonía con la naturaleza.

CURTIS N. RUNNELS, profesor de la Universidad de Boston, estudió arqueología en las de Kansas e Indiana. Ha trabajado durante 20 años en Grecia, especializándose en la relación entre los asentamientos humanos y el paisaje.

Sir Peter B. Medawar calificaba, en *The Limits of Science*, de "arcádica" semejante forma de pensar. Tras comparar los conceptos de "utopía" y "arcadia", llegaba a la conclusión de que lo arcádico está más cerca del ideal de la edad de Oro que las Utopías de Tomás Moro y Francis Bacon; eran éstas lugares donde la técnica, fundada en la ciencia, se aplicaba al progreso de la sociedad, en tanto que la Arcadia —pastoril, precientífica y pretécnica—constituía la situación más alejada de la Utopía. En Arcadia, la humanidad vive en felicidad, ignorancia e inocencia, libre de las enfermedades y las tensiones psicológicas que la civilización acarrea: viviendo en ese estado de tranquilidad espiritual interna que hoy sólo se deriva de una renta sustanciosa.

Los efectos del pensamiento arcádico se reflejan en el debate entablado para determinar en qué medida los griegos de la antigüedad fueron responsables de la deforestación y erosión que han reducido buena parte del país a un erial pedregoso. Sin duda, la degradación ambiental (si no sus causas) se observó en tiempos pretéritos; aparecen muchas referencias en los escritos de Platón, Aristóteles y otros clásicos. Dan cuenta precisa, y parece que como testigos oculares, de la deforestación y la erosión del suelo en el siglo IV a.C. La arqueología puede confirmar ahora que en la antigüedad se esquilmaron suelos y bosques, con obvia responsabilidad de los habitantes.

A lo largo de los últimos veinte años, la introducción de técnicas de estudio regional intensivas y multidisciplinares ha revolucionado la arqueología griega. Un aspecto de esta revolución se advierte en el desplazamiento del foco de atención, de la investigación de los yacimientos uno a uno al estudio de la historia natural y cultural de regiones enteras. Este nuevo enfoque se sirve de nuevos métodos de trabajo de campo; en particular, se crean equipos de investigadores que acotan zonas extensas (de más de 100 kilómetros cuadrados) y registran cada artefacto, característica y yacimiento que pueda detectarse. Se hace también amplio uso de los métodos de detección remota —sistemas radáricos e imágenes de satélites— para descubrir huellas de actividad humana en el pasado. Además, el advenimiento de la geoarqueología ha puesto las bases para interpretar los contextos naturales donde se desarrollaron las culturas antiguas.

Un ejemplo de la colaboración entre arqueólogos y geoarqueólogos puede encontrarse en el estudio del cambio paisajístico acaecido en el sur de Grecia. Dos proyectos importantes sobre la Argólida (zona nororiental de la península del Peloponeso), en los que he participado desde 1979, combinaban excursiones a pie, para identificar los yacimientos arqueológicos, con trabajos geológicos de reconstrucción histórica del paisaje a lo largo del Pleistoceno y el Holoceno, es decir, durante los últimos 50.000 años.

De los dos proyectos, uno abarcaba la llanura de Argive. Cuenta Aristóteles que esta región había experimentado una considerable alteración en la edad del Bronce (desde el 3000 hasta el 1000 a.C.). Para investigar el uso antiguo de la tierra, formé grupo con Berit Wells, director del Instituto Sueco en Atenas, y Eberhard A. W. Zangger, docente hoy



1. EDAD DE ORO de la Grecia clásica, simbolizada en *El Juicio de Paris*, que Claude Lorrain pintó en 1646. La diosa de la discordia lanza una manzana con la inscripción "a la más bella" y ordena que Paris la otorgue a una de las tres diosas. La visión persistente de los griegos como administradores de una tierra que consideraban gobernada por dioses y diosas se ve desmentida por las recientes pruebas arqueológicas de erosión del suelo causada por el mal uso.

en la Universidad de Heidelberg. Centramos el trabajo en el valle de Berbati y en el de Limnes, situados en el borde septentrional de la planicie de Argive y con una superficie conjunta de 60 kilómetros cuadrados.

Este proyecto, patrocinado por el Instituto Sueco y dirigido por Wells, constaba de dos partes: estudio geoarqueológico de los dos valles, a cargo de Zangger, y un intensivo estudio arqueológico.

La investigación sacó a la luz pruebas de actividad humana desde el Paleolítico medio, hace unos 50.000 años, y demostró que los agricultores se establecieron en la zona hace unos 7000 años, asentándose en los márgenes del valle de Berbati, junto a suelos más feraces y agua abundante. Tras esa colonización inicial, el tamaño de los asentamientos neolíticos originales empezó a crecer y se fundaron otros nuevos. En el Neolítico superior (entre el 4000 y el 3000 a.C.), había distribuidos por la región más de 20 asentamientos y otros alojamientos menores. La expansión continuó durante los primeros siglos del tercer milenio, a comienzos de la edad del Bronce.

De los asentamientos mayores se recogieron pruebas de cultivo de los campos y muchos artefactos, como cerámica, molinillos de mano para la molienda de cereales y útiles sencillos de sílex y obsidiana. Algunos de los alojamientos menores cumplían cometidos especiales (como cobertizos para los pastores y chamizos para las herramientas, por ejemplo) y no estuvieron necesariamente habitados de forma permanente. Con todo, demuestran el uso más intensivo del paisaje en esa época, porque están emplazados en pendientes empinadas, a gran altitud y en zonas donde siempre hubo sólo suelos de productividad marginal.

Además de descubrir yacimientos donde la actividad humana dejó un cúmulo de artefactos, nuestra técnica de investigación reveló decenas de miles de útiles neolíticos dispersos por el campo. Esa distribución irregular de artefactos se advierte en zonas hoy deshabitadas y en algunos casos inhabitables porque están desprovistas de suelo y vegetación.

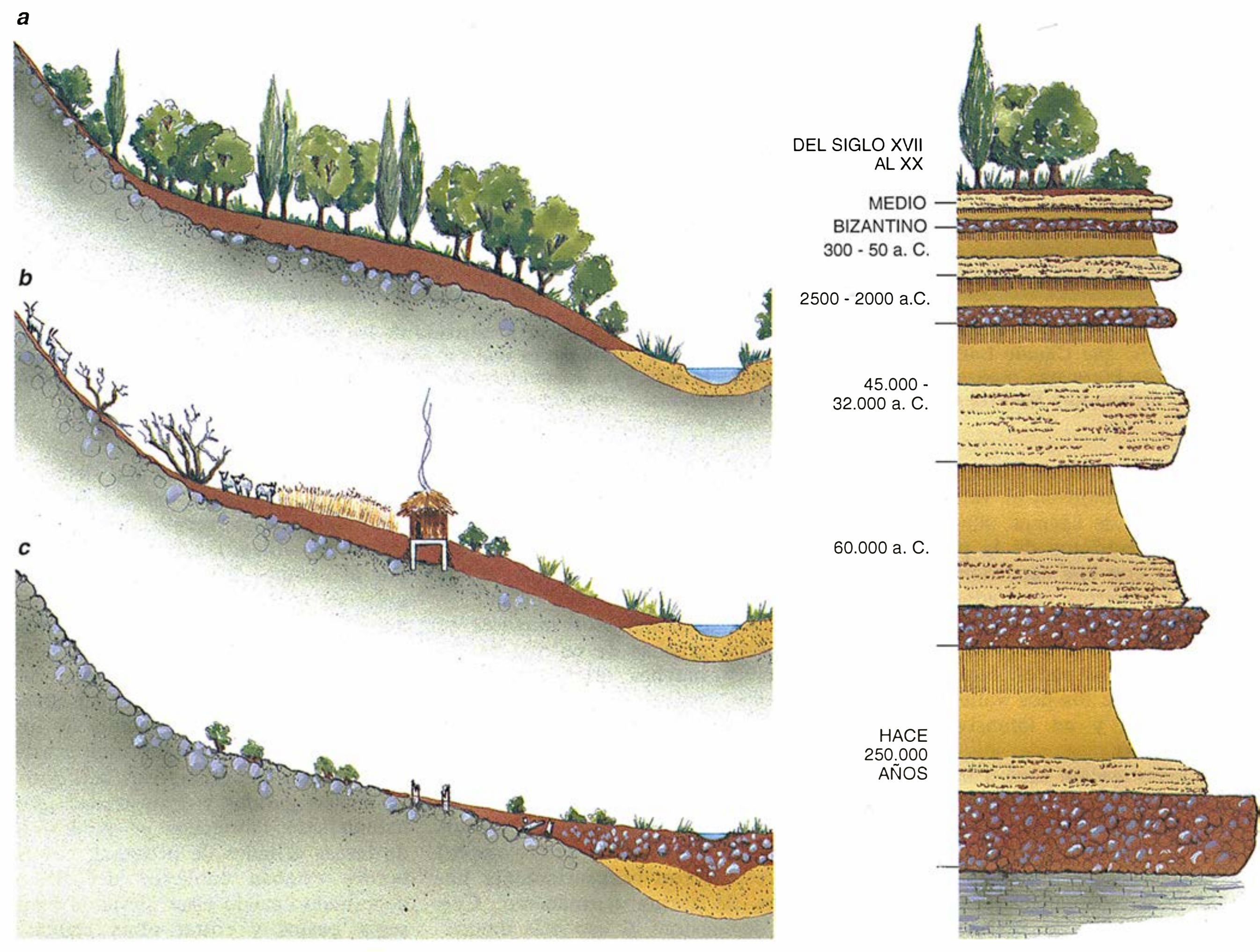
El patrón de asentamientos y artefactos nos revela la estructura de un paisaje cultural fósil. Revisten particular interés los numerosos hallazgos de hachas pulidas y deslustradas, que habían sido fabricadas en piedra, y de lascas afiladas de pedernal, cuyos bordes estaban cubiertos del sílice depositado cuando éstas sirvieron para segar pastos y cortar otras plantas. Estas herramientas agrícolas habituales pertenecen al período Neolítico y a la edad del Bronce Temprano, y dan testimonio de lugares que antaño fueron campos de cultivo. Creemos que el pastoreo y la agricultura fue-

ron las principales actividades desempeñadas en las laderas de los valles de Berbati y Limnes desde el 4000 al 3000 a.C. y que tuvieron como consecuencia uno o más episodios de erosión catastrófica del suelo, que formó conos de deyección en los fondos de los valles y profundas capas de sedimentos que cubrieron las llanuras argivas.

Uno de esos episodios ocurrió al final del Neolítico, mucho después de la expansión del asentamiento hasta los valles de Berbati y Limnes. La erosión enterró al menos un yacimiento neolítico en la llanura de Argive, que se encontró en uno de los testigos del sondeo que Zangger realizó a través del grueso aluvión. Lo que parece haber sido un segundo acontecimiento similar se produjo en el tercer milenio, al final de la edad del Bronce Temprano. Los depósitos procedentes de la erosión de este período se extendieron por la planicie argiva para constituir gran parte de lo que es su superficie actual. Pero no fueron éstos los últimos acontecimientos que se registraron. Las inundaciones arrasaron partes de la ciudad de Tirinto al final de la edad del Bronce Tardío (alrededor del 1200 a.C.). Después de este desastre natural, se abandonaron las laderas de Berbati, que, en su mayor parte, nunca volvieron a ocuparse.

La imagen ofrecida por el registro arqueológico se confirmó con el análisis del polen desenterrado en una muestra extraída a una profundidad de siete metros, en el ahora desaparecido lago Lerna de la planicie de Argive. Susanne Jahns, que estudió ese resto vegetal, ha demostrado que, en el Holoceno, abundaban en la Argólida robles de hoja caduca. A mitad del cuarto milenio antes de Cristo, sin embargo, el polen del roble disminuyó, reemplazado por el de carpe, pino, roble achaparrado y brezo. Estas plantas son endémicas de la tierra deforestada y removida. Hoy, las laderas que rodean la planicie de Argive son roquedales casi desnudos y provistos de una fina capa de vegetación de monte bajo, caracterizada por arbustos y plantas herbáceas, con manchas dispersas de árboles, pinos sobre todo.

Otros trabajos de investigación llevados a cabo en Grecia han permitido descubrir signos de erosión del suelo. El momento en que ocurrieron estos episodios no se superpone con los períodos de erosión de la Argólida. Si el clima hubiera sido la única causa, la mayor parte de Grecia se habría visto afectada a la vez. La variación cronológica indica, por tanto, una intervención humana. El aclaramiento de la vegetación espontánea en las laderas, necesario para su cultivo y para dejar espacios abiertos donde pastar las ovejas y las



2. LA AGRESION DE LA TIERRA por los griegos siguió un modelo constante (*izquierda*). Al principio (*a*), un bosque mixto retenía el suelo en una ladera. Cuando el bosque se aclaró para siembra (*b*), el suelo permaneció aún sujeto durante cierto tiempo, pero la erosión terminó por arrastrarlo hasta el valle (*c*). Un perfil geológico típico (*derecha*) de la región de la Argólida muestra una secuencia de depósitos erosivos y suelos intermedios (con sus edades aproximadas) producidos como consecuencia. En cada período sucesivo, el suelo que se va formando sobre los depósitos es cada vez más delgado y está menos desarrollado y, por tanto, ve mermada su capacidad para sustentar la vegetación.

cabras, inestabilizó el suelo y, por consiguiente, desencadenó una erosión general y permanente.

Nuestro segundo proyecto nos proporcionó más pruebas de la agresión local del suelo. Este estudio se llevó a cabo en la Argólida meridional, zona remota de la península del Peloponeso. En colaboración con Michael H. Jameson y Tjeerd H. van Andel realicé un reconocimiento arqueológico de unos 250 kilómetros cuadrados. Durante el estudio se identificaron más de 350 yacimientos de actividad humana que cubrían un período de 50.000 años.

Al representar el número de yacimientos por período arqueológico surgió un modelo interesante de los asentamientos. Resultó que no hay una distribución uniforme de los mismos en el tiempo; antes bien, aparecen una serie de picos y valles abruptos, lo que sugiere la existencia de períodos de expansión seguidos de intervalos de abandono. Y algo sorprendente, podía establecerse una correlación entre este modelo inesperado de asentamientos y la historia geológica de la región.

Paraíso perdido

"En la época de las guerras de Troya la tierra de los argivos era pantanosa y sólo podía alimentar a una pequeña población, mientras que la de Micenas era exuberante (y por esa razón Micenas era superior). Pero ahora ocurre lo contrario... la tierra de Micenas se ha convertido en... seca y árida, en tanto que la de los argivos, antes inhóspita por culpa de las ciénagas, se ha vuelto feraz. Es de suponer que el mismo proceso ocurrido en esa región opere en países enteros y a gran escala."

Aristóteles, *Meteorologica*, Libro 1, Capítulo 14



Paisaje típico de la Argólida, hoy

Esta correlación se obtuvo de un análisis de la historia erosiva del área, que realizaron van Andel y Kevin O. Pope. Una característica innovadora de su trabajo fue el estudio de los suelos. Se distinguen éstos de los depósitos de erosión porque se forman sobre los propios depósitos en virtud de la agresión química y transformación de los sedimentos subyacentes: un proceso que puede tardar miles de años en las partes semiáridas de Grecia. Van Andel y Pope identificaron al menos siete ciclos de erosión del suelo, a los que siguieron épocas de estabilidad, durante las cuales se acumularon gruesos perfiles del suelo. Las características de los perfiles relacionadas con su edad nos permiten establecer la correlación entre los episodios de erosión y perfiles, de un lado, y hallazgos arqueológicos, de otro.

Tres de los acontecimientos erosivos que dejaron huella en el registro geológico acontecieron durante el último período glacial (hace unos 272.000, 52.000 y 33.000 años): pueden atribuirse, pues, a los cambios climáticos globales. Pero cuatro episodios pertenecen a los últimos 5000 años. Tras cada uno de ellos (correspondientes aproximadamente al 2500 a.C., al período 350-50 a.C, al intervalo 950-1450 d.C y a tiempos recientes) sobrevino un período de estabilidad, durante el cual se formaron perfiles sustanciales del suelo. Aunque es posible que cambios climáticos a pequeña escala expliquen en parte este modelo, nosotros culpamos de él fundamentalmente a las actividades de los lugareños. Y disponemos de pruebas por duplicado para atrevernos a hacer esta acusación: por un lado, la correlación observada entre los períodos de erosión y los períodos de asentamiento humano intenso y, por otro, la formación de suelo durante los períodos en los que el impacto humano fue mínimo.

La técnica de datación que utilizamos se inició con una búsqueda de los yacimientos arqueológicos y los artefactos cubiertos por aluviones, enterrados o conservados en ellos. Combinando los datos arqueológicos con los geológicos fechamos con notable precisión las épocas de la erosión. Elemento importante en este trabajo fue el reconocimiento de que podíamos basarnos en los horizontes estratagráficos para determinar los períodos de estabilidad de la superficie que contrastaban con los períodos erosivos.

A partir de estos datos llegamos a la conclusión de que el clareo de la vegetación durante las épocas de asentamiento humano intenso comportó la erosión del suelo, que, a su vez, forzó el abandono de los asentamientos o, por lo menos, frenó la actividad. Esta menor presión del hombre permitió que los depósitos erosivos se estabilizaran con la consiguiente formación de los suelos.

Se han publicado trabajos sobre erosión del suelo, en una escala similar, en otras partes de Grecia: Macedonia, Tesalia, islas de Eubea y Creta. Los episodios se fechan en épocas remotísimas, en el VI milenio a.C., y prosiguen sin apenas solución de continuidad hasta nuestros días.

Todo lo que hemos averiguado nos permite defender que los cambios del paisaje natural acaecidos en la antigüedad son resultado, al menos en parte, de una actividad humana de mente alicorta. La humanidad tiene una larga historia de mal uso de la tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE BERBATI-LIMNES ARCHAEOLOGICAL SURVEY: THE 1988 SEASON. Berit Wells, Curtis Runnels y Eberhard Zangger en *Opuscula Atheniensia*, vol. 18, n.º 15, págs. 207-238; 1990.

NEOLITHIC TO PRESENT SOIL EROSION IN GREECE. E. Zangger en *Past and Present Soil Erosion*. Dirigido por Martin Bell y John Boardman. Oxbow Books, 1992.

THE GEOARCHAEOLOGY OF THE ARGOLID. Eberhard Zangger. Mann Verlag, 1993.

Ciencia y empresa

Carcinoma pulmonar

Tratamiento

El cáncer de pulmón constituye uno de los problemas socioeconómicos más importantes de la sociedad occidental. Es la primera causa de muerte por cáncer y la segunda de forma global, tras las enfermedes cardiovasculares, en el hombre de edad media. La incidencia en EE.UU. es de 150.000 casos por año y en la Unión Europea de 135.000.

Cada día esta más clara su relación con el consumo de tabaco, confirmada en numerosos estudios epidemiológicos, histológicos y de cultivos celulares. Los ambientes con gran concentración de asbesto y radón, o muy contaminados, incrementan también su incidencia.

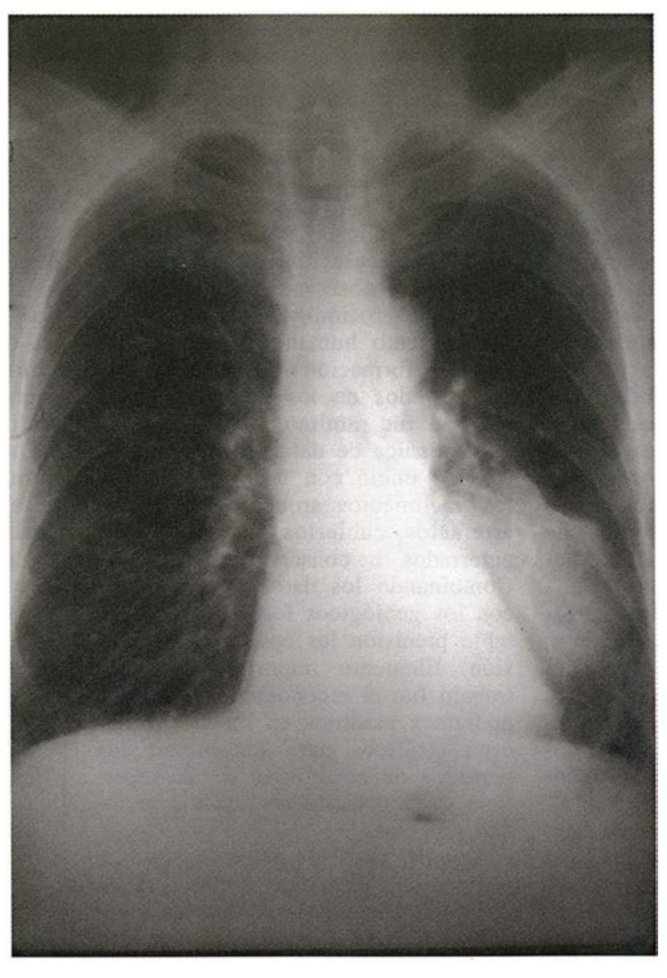
Desde el punto de vista de manejo clínico, diagnóstico y terapéutico, el cáncer de pulmón se divide en dos tipos con un pronóstico y evolución distintos. Por una parte, el cáncer pulmonar microcítico o indiferenciado de células pequeñas, de rápido crecimiento y gran capacidad de metastatización, y, por otra, el cáncer pulmonar no microcítico, que incluye las variedades histológicas restantes (epidermoide, adenocarcinoma e indiferenciado de células grandes), caracterizado por una evolución más lenta y potencialmente curable por cirugía en situaciones localizadas.

El carcinoma pulmonar microcítico o de células pequeñas (CPCP) tiene una historia natural, dejado a su propia evolución, muy corta, aproximadamente de 3 meses. Esto hace que, salvo excepciones, incluso en casos muy limitados, no se considere subsidiario de cirugía, al existir diseminación visible o no en todos los casos. El tratamiento actual se basa en combinaciones de quimioterapia con diversos tipos de agentes. Con este tratamiento se puede conseguir un 80-90 % de respuestas (reducciones del tamaño del tumor superior al 50 %), de las cuales alrededor del 50 % son completas (desaparición de cualquier signo o síntoma de la enfermedad). Una vez alcanzada la máxima respuesta se administran varios ciclos de consolidación, habitualmente un total de 6 y, a continuación, en los casos con enfermedad limitada al tórax, aunque no de una forma claramente establecida, se suele aplicar radioterapia torácica de consolidación para retrasar las recaídas a este nivel. Dada la gran frecuencia de aparición de metástasis cerebrales, algunos centros consideran indicado también la realización de un tratamiento ionizante holocraneal profiláctico, con lo que se consigue una reducción de su presencia, aunque no una mayor supervivencia global.

A pesar de las excelentes respuestas, el CPCP suele recaer al cabo del año o año y medio, habitualmente en el torax acompañado de alguna otra localización extratorácica. En las mejores series terapéuticas, las supervivencias medianas están alrededor del año y medio o 20 meses. Hay que resaltar que sólo el 10-15 % de los enfermos con CPCP alcanzan supervivencias superiores a 3 años, y que muchos de éstos presentarán más adelante una segunda neoplasia pulmonar, distinta de la anterior (terreno bronquial abonado para el desarrollo de diversos tumores).

Bajo el epígrafe de carcinoma pulmonar no microcítico o de células no pequeñas (CPCNP) incluimos todas las variedades que no se consideran microcíticos, esto es: epidermoide, adenocarcinoma, indiferenciado de células grandes, etcétera. Estos tipos no tienen la capacidad de crecimiento de los anteriores, aunque es conocida su agresividad y mal pronóstico en general. El CPCNP, en su estadio inicial, va a ser abordable y potencialmente curable por cirugía, aunque, dada la población en la que aparecen (ancianos, fumadores, antecedentes de enfermedades limitantes graves, cardiopatías, problemas vasculares, etc.), muchos enfermos que serían resecables desde el punto de vista técnico, no serán operables por las severas complicaciones que quedarían o por la imposibilidad respiratoria posquirúrgica, teniendo en cuenta que muchos de ellos van a sufrir una neumonectomía (resección de un pulmón). Por otra parte, la cirugía sólo va a ser posible en aquellos que, tras un profundo estudio de extensión, sólo presentan enfermedad limitada al parénquima pulmonar con afectación o no ganglionar hiliar o mediastínica en el mismo lado de la lesión (estadios I, II o III-A).

En general, se puede decir que, de 100 pacientes que se diagnostiquen de CPCNP, 70 van



Carcinoma pulmonar de lóbulo inferior izquierdo

a ser irresecables, 40 por la presencia de metástasis a distancia y 30 por diseminación ganglionar al mediastino contrario a la lesión inicial. De los 30 potencialmente resecables, 10 serán inoperables por las limitaciones antes expuestas y sólo 20 van a poder ser curados con cirugía. Dentro del último grupo, dependiendo de la extensión, tamaño, tipo de cirugía, etc., se conseguirán mejores o peores resultados. Así, los estadios I precoces (tumor pequeño limitado a un lóbulo pulmonar, sin afectación ganglionar) tiene una supervivencia a los 5 años del 70 %, mientras que los estadios III-A (lesión pulmonar que no afecta a estructuras vasculares, cardiacas, etcétera, con infiltración ganglionar del mediastino del mismo lado de la lesión) tiene una supervivencia del 5-10 % a 5 años.

Dado que cualquier progreso en este tumor tan frecuente tiene un gran alcance socioeconómico, en los últimos años se están llevando a cabo nuevos tratamientos o combinaciones de los mismos para mejorar, aunque sea de forma limitada, las expectativas de estos enfermos. Así, los pacientes con enfermedad locorregional de mal pronóstico o no resecable se someten a tratamientos combinados con quimioterapia de entrada para reducir el tamaño del tumor, posterior cirugía y luego radioterapia de consolidación. De esta forma conseguimos que pacientes con una probabilidad de supervivencia a 5 años menor del 5 % pase al 30-35 %. No hay que olvidar el papel que desempeña la quimioterapia en el frecuente estadio avanzado o metastásico, incurable por ahora. Conseguimos porcentajes de respuestas próximas al 40-45 %, lo cual, hasta ahora, no significa curación, aunque sí una mejoría de la calidad y alargamiento de la vida del paciente.

Se están desarrollando fármacos más activos y, en general mejor tolerados, que permiten incluir a los enfermos que lo desean voluntariamente en protocolos de investigación. De esta forma conseguiremos que el futuro de estos tumores sea poco a poco más esperanzador. También son fundamentales las investigaciones, todavía muy prematuras, que se están llevando a cabo en el campo de la prevención primaria y secundaria, así como, en el conocimiento de los determinantes biológicos (factores de crecimiento, oncogenes, etc.) que nos ayudarán a conocer mejor la evolución y factores de riesgo de estos cánceres.

J. L. González Larriba
Hospital Universitario de San Carlos. Madrid

Economía del empleo

Significado de las estadísticas

Los economistas, astrofísicos, sociólogos, geólogos así como algunos investigadores en medicina consumen gran cantidad de tiempo tratando de interpretar experimentos que nos han sido dados. Si no hubiera estrellas viejas y jóvenes, los astrofísicos no sabrían mucho acerca de la evolución estelar. De manera análoga, si no se supiera ya que el salario mínimo varía, con respecto al salario medio, de un decenio a otro y de un país a otro país, los economistas lo pasarían muy mal para convencer a nadie de que las subidas del salario mínimo dejan sin trabajo a los jóvenes y obreros no cualificados.

Los economistas y los astrofísicos elaboran sus teorías a partir de las regularidades observadas. Aspecto crítico de su tarea es el de decidir si ciertas correlaciones denuncian una ley escondida o se deben al albur veleidoso de la coincidencia. En particular, los economistas no logran convencer a casi nadie de que las subidas del salario mínimo no contribuyen al desempleo, por mucho que insistan en que la investigación no advierta efectos "estadísticamente significativos" sobre la contratación laboral.

Pero, ¿qué significa exactamente esa frase? Retrocedamos dos siglos, hasta Pierre Simon, marqués de Laplace, quien comenzó a aplicar el concepto de significación estadística a un problema científico. En 1773, Laplace se propuso averiguar de dónde venían los cometas. Razonó que, si se originaban en el interior del sistema solar, deberían describir órbitas en el mismo plano que los planetas, mientras que, si venían del espacio exterior, sus trayectorias no mostrarían correlación con las de los cuerpos que giran alrededor del Sol. Laplace analizó los movimientos de los últimos doce cometas descubiertos y rechazó resueltamente la hipótesis de que los cometas procedían del interior del sistema solar. Si los cometas tuvieran un origen local, cualquiera podría por azar moverse formando un ángulo extraño con aquel plano. Pero la probabilidad de encontrar dos anomalías sería más baja, la de tres todavía menor: la probabilidad, por decirlo así, de hacer girar los dos ojos independientemente tres veces seguidas. Muy perspicaz, Laplace.

A lo largo de los dos siglos siguientes, los estadísticos han venido refinando esa idea elemental hasta convertirla en una pomposa "significación estadística" y han desarrollado todo un arsenal teórico para determinar si el fenómeno que los investigadores observan se debe a un error de muestreo o a efectos "reales". La regla de oro para la mayoría de los estudios es el "nivel de confianza del 95 por ciento", lo que indica que la probabilidad de que un resultado se deba al azar es de sólo un caso en 20. Los economistas la usan para comprobar si el salario mínimo ejerce un efecto "significativo" sobre el empleo; los clínicos, para decidir si media aspirina al día mantiene alejado al cardiólogo.

Pero poco a poco algunos se han ido dando cuenta de que el asunto no es tan seguro. Los científicos se preocupan de si un resultado es estadísticamente significativo, pero deberían quizá preocuparse mucho más de si tiene sentido; si coincide, para usar un término corriente, con el sentido común. Por desgracia, muchos ven, en la significación estadís-



¿Pérdida de empleos? Algunos economistas dicen que los trabajadores peor pagados serán despedidos si el salario mínimo sube; otros afirman que los indicios son estadísticamente insignificantes

tica, una medida del sentido. Si una respuesta satisface el criterio del 95 por ciento de confianza, debe ser importante; si no lo satisface, no lo es.

La refutación más clara de esta idea provino del estudio que estableció el efecto salvavidas de la aspirina en personas que ya habían sufrido un ataque cardíaco. Los investigadores detuvieron el experimento antes de que el número de casos alcanzara significado estadístico "real" porque el efecto de una simple media aspirina diaria era tan evidente, que consideraron inmoral continuar dando placebos a nadie.

Laplace andaba sobrado de razón en el caso de los cometas, pues era evidente la idoneidad de su escala para para medir el sentido de las órbitas. Además, una muestra de una docena podía dar resultados significativos, para la ciencia y para la estadística. Pero la escala para medir los efectos de la aspirina o del salario mínimo no es tan clara: puede uno obtener respuestas estadísticamente impecables que no afectan a nadie y otras "no significativas" (o insignificantes) que son absolutamente cruciales.

David Card y Alan B. Krueger, de la Universidad de Princeton, han usado pruebas de representatividad estadística para defender que no existen pruebas convincentes de que el salario mínimo ejerza ningún efecto notable en el mercado laboral. La mayoría de los economistas discrepan, sin embargo; por una doble razón: la inercia de su teoría que les obliga a rechazarlo y la excesiva certeza que, en su opinión, reclaman Card y Krueger. De acuerdo con lo que el gobierno decida, muchas personas pobres (por no mencionar los estudiantes en períodos de vacaciones) se quedarán sin empleo. Y los analistas económicos sin saber cuántos empleos se habrán perdido o hasta qué punto influyó la subida del salario mínimo.

DONALD MCCLOSKEY

Motores y sensores

Con diamantes

Desde los años ochenta, la literatura de fantasía científico-tecnológica ha venido ideando aventuras imaginarias para las diminutas máquinas eléctricas hechas de pastillas de silicio. No han valido gran cosa para casi nada más. El rozamiento, la fragilidad y la corrosión son las enfermedades que atacan al silicio. En su haber tiene, sin embargo, la facilidad con que deja moldearse en complicadas formas microscópicas; los ingenieros de circuitos integrados han gastado billones de pesetas en desarrollar herramientas que promueven su crecimiento, grabado, dopado y aleación con otros metales. El sector de la micromecánica sólo ha tenido que tomar el coche en marcha.

Ahora, un grupo de microfabricantes está dispuesto a hacerse con el volante. En *Applied Physics Letters* un grupo de físicos del Laboratorio Nacional de Oak Ridge explica que han construido diminutos aparatos mecánicos con diamante. El diamante tiene un coeficiente de rozamiento mucho menor que el silicio; posee también mayor tenacidad y dureza y es más resistente al ataque químico.

John D. Hunn y sus colaboradores han desarrollado una técnica para grabar figuras en láminas de diamante. Primero bombardean la superficie de un diamante con iones oxígeno de alta energía para crear una capa de grafito dentro del cristal (los iones no producen defectos en la superficie, donde se mueven rápidamente, sino que causan desorden donde se detienen). Luego, hacen crecer una capa de lámina de diamante encima del diamante preparado. A continuación, un láser ultravioleta corta una zanja a través de la lámina hasta llegar a la capa de grafito, esbozando la forma de las piezas a construir. Por último, se coloca el diamante en un horno donde el oxígeno a alta temperatura quema el grafito, dejando cada pieza libre de su substrato.

El proceso permite construir engranajes de sólo cuatro décimas de milímetro de diámetro. Semejante rueda dentada podría fácilmente servir de rotor en un pequeño motor eléctrico. La nueva pieza de diamante se podría introducir en uno de los armazones de silicio que ya se han construido. Con todo, el verdadero rendimiento de la técnica lo constituirán los sensores de diamante. Una membrana de lámina de diamante finamente grabada, mediante una técnica de iones implantados, podría avisar de los cambios de presión en el interior de un líquido corrosivo que destruiría un sensor de silicio.

Pero no contaremos con tales microsensores mañana, ni siquiera el año que viene. Habrá antes que aprender a integrar las actividades de fabricación electrónica en su técnica de mecanizado. Lo que no quita valor al proyecto de Oak Ridge, que ha dado ya un nuevo significado a la "fase de joyería" de la investigación y desarrollo de alta tecnología.

PAUL WALLICH

Creaciones informáticas

G. Theraulaz, E. Bonabeau,
S. Goss, J.-L. Deneubourg

La inteligencia colectiva. Así buscan las hormigas su alimento y organizan su nido

Las habilidades colectivas de los insectos sociales (hormigas, abejas, avispas y termitas) tienen intrigados a filósofos y entomólogos. ¿Cómo logran estos artrópodos construir sus nidos, de estructura tan compleja? ¿Qué mecanismos permiten regular sus actividades a los individuos de una colonia y favorecer así la supervivencia de la especie?

Parece como si un agente invisible, situado en el centro de la colonia, coordinase las actividades de todos los individuos. A principios de este siglo, el escritor M. Maeterlink, para explicar sus observaciones, postuló, románticamente, la existencia de "un alma de la colmena". En 1911, el entomólogo W. Wheeler se valió de la metáfora del organismo social y propuso la noción de superorganismo: las sociedades de insectos parecían similares a microorganismos unicelulares. En ellas, la reina desempeñaría el papel del núcleo celular; la masa de las obreras, el del resto de la célula; las pistas marcadas químicamente que siguen los individuos para buscar alimento equivaldrían a los pseudópodos que las células emiten para alimentarse.

A partir de los años cincuenta, los trabajos de la escuela francesa de entomología sobre las construcciones colectivas de las termitas (Pierre-Paul Grassé), de las hormigas (Remi Chauvin) y de las abejas (Roger Darchen) precisaron de forma mucho más concreta la noción de comportamiento global resultante de una multitud de interacciones locales.

GUY THERAULAZ trabaja en el Centro de Investigación de Biología del Comportamiento del CNRS francés en Toulouse. ERIC BONABEAU es ingeniero de investigación en el Centro Nacional de Estudios de Telecomunicaciones de Lannion. SIMON GOSS, investigador de la Universidad Libre de Bruselas, se halla encuadrado en la unidad de ecología comportamental teórica que allí dirige JEAN-LOUIS DENEUBOURG.

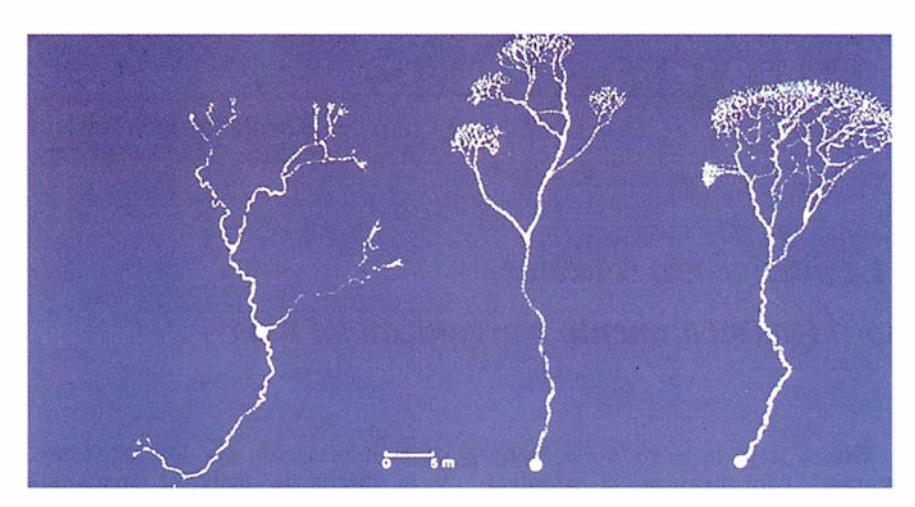
Grassé forjó la teoría de la "estigmergia" para explicar la coordinación de las tareas individuales; puso de manifiesto que, en la actividad constructora de las termitas, la regulación de las construcciones no dependía directamente de las obreras, sino de las construcciones mismas. La obrera no dirige su trabajo: es el trabajo el que la dirige a ella. Así pues, todo insecto, al construir, modifica la forma del estímulo que desencadena su comportamiento y provoca la aparición de nuevos estímulos, que desencadenarán otras reacciones, sea en sí mismo o en uno de sus congéneres. El plan de construcción del nido no es sino consecuencia de la sucesión de estímulos, que van cambiando a medida que se modifica la forma construida.

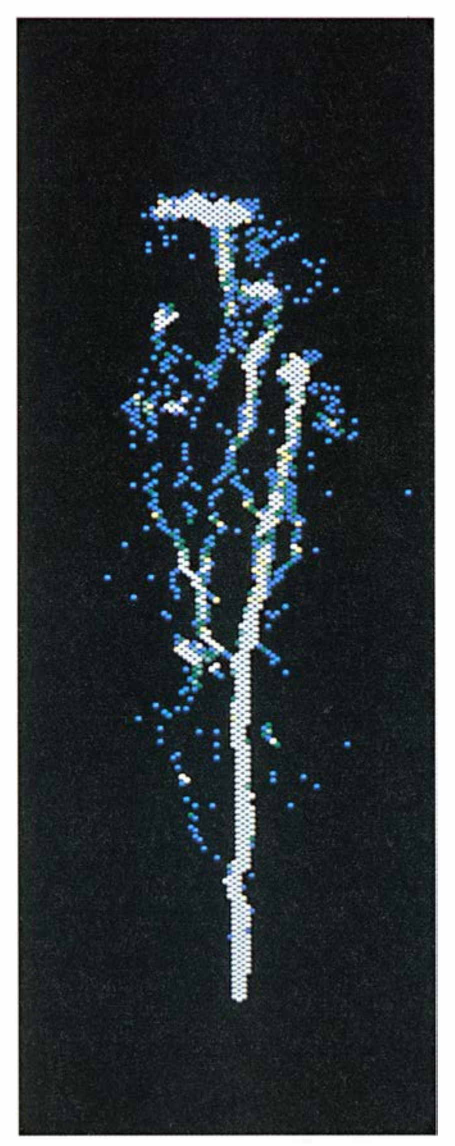
La naturaleza de estas interacciones, los mecanismos de tratamiento de la información por los individuos y la diferencia entre el comportamiento solitario y el comportamiento social siguen siendo un misterio. En 1977, uno de los autores (Deneubourg) observó que estos fenómenos de cooperación entre insectos se parecían a los fenómenos de auto-organización y de estructuras disipativas detectados en diversos sistemas físicos o químicos: en las sociedades de insectos, las configuraciones globales coherentes características de la especie (construcción de un nido, establecimiento de una red de pistas en los alrededores del nido en el caso de las hormigas, diferenciación y asignación de las tareas, etc.) son resultado, por una parte, de comunicaciones entre los individuos y, por otra, de las interacciones entre los insectos y su entorno.

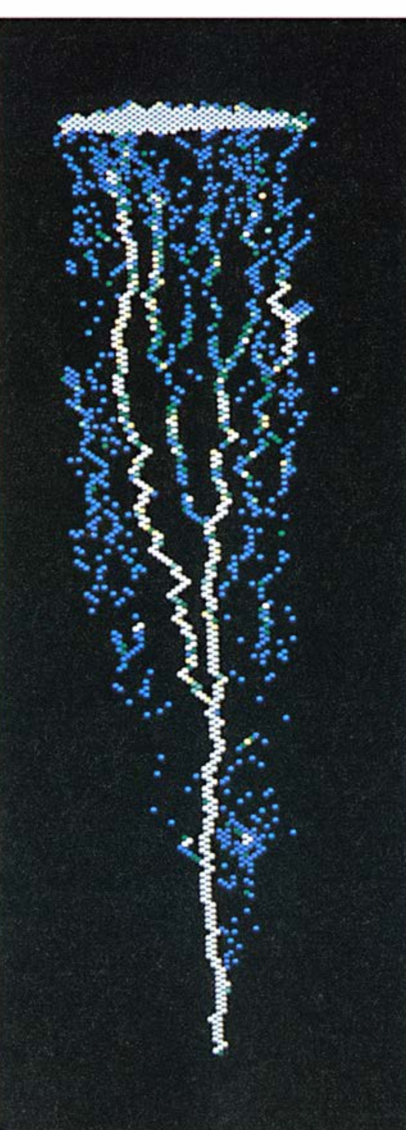
Se observa un tipo igual de orga-



1. Lo mismo que Pulgarcito, las hormigas van marcando el camino que toman entre su nido y una fuente de alimentos que han descubierto. La señalización por deposición de feromona está confirmada en esta experiencia, en la cual se ha conectado un nido con una fuente de alimentos mediante un puente que tiene dos ramas de diferente longitud. Cuando una hormiga pasa por una pista previamente seguida por una de sus congéneres, refuerza el marcado. Dado que las moléculas de feromona se evaporan, el marcado sólo subsiste en las rutas frecuentadas, que son las más cortas. Las colonias de hormigas optimizan así la búsqueda de alimentos







2. Las rutas seguidas por las diversas especies de hormigas dan lugar a motivos característicos, denominados estructuras de forrajeo. La figura superior muestra las estructuras de forrajeo de tres especies de hormigas: Eciton hammatum *(izquierda),* Eciton rapax *(centro) y* Eciton burchelli *(derecha). El círculo blanco indica la posición de la colonia. Abajo, dos estructuras de forrajeo de hormigas que se han obtenido gracias al algoritmo explicado en el artículo*

nización espontánea en sistemas físicos (células de convección en los líquidos, por ejemplo), químicos (reacciones oscilantes) o biológicos (espirales formadas en la agregación de las amebas). En estos sistemas, inicialmente homogéneos o estacionarios, aparecen estructuras organizadas si los componentes interactúan de forma no lineal (esto es, si las reacciones no son proporcionales a los estímulos). De hecho, en las sociedades de insectos, las interacciones entre los individuos o entre los individuos y las tareas que desempeñan son no lineales.

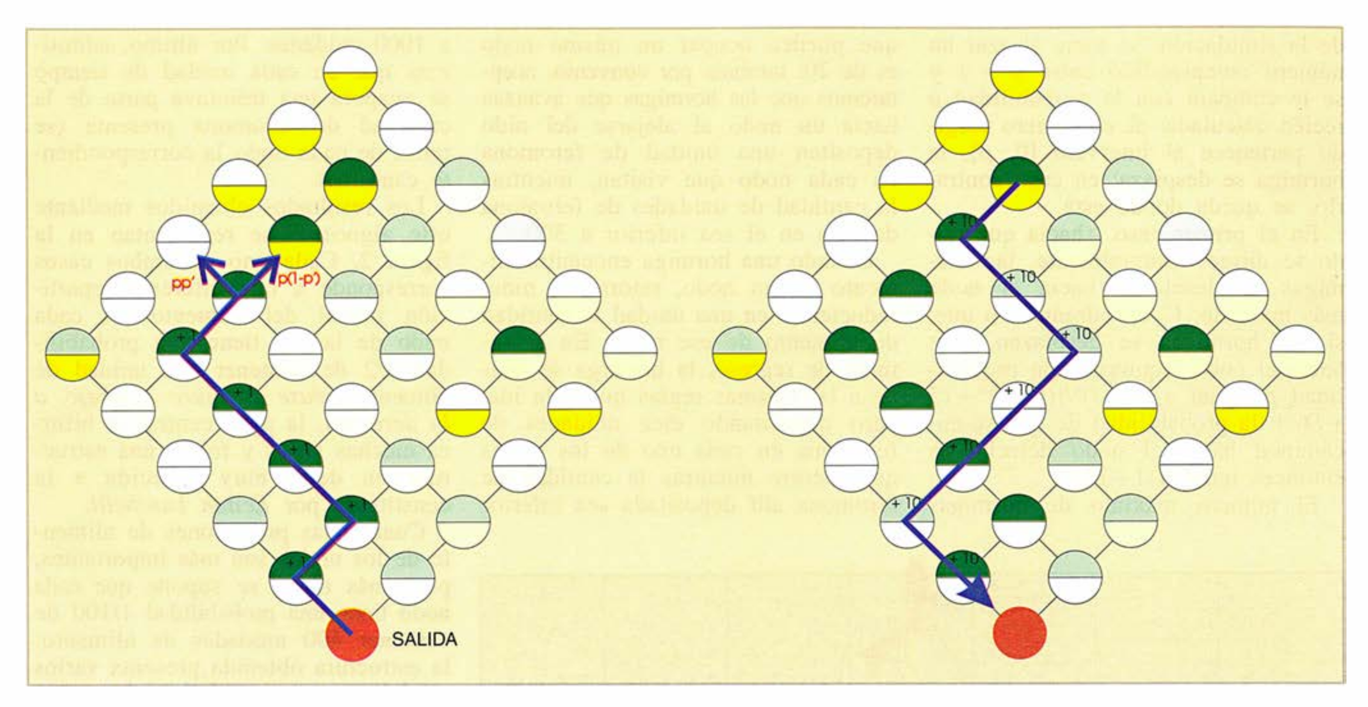
Examinaremos aquí dos modelos teóricos, fundados sobre procesos de este tipo, que describen la aparición de diversas estructuras coloniales. Damos, en cada caso, un algoritmo sencillo que permite la simulación de estos modelos en un ordenador de sobremesa.

Las hormigas de Panurgo

Para comprender la aparición de estructuras colectivas en una sociedad de insectos es necesario saber cómo interactúan los individuos de una colonia, lo cual exige ora un estudio etológico minucioso, ora el recurso a simulaciones. En este segundo caso se parte de hipótesis concernientes tanto al comportamiento como a las interacciones individuales, se simulan los comportamientos y se comparan seguidamente los resultados con las observaciones.

Una de las interacciones sociales más comúnmente observadas en la naturaleza es el alelomimetismo, esto es, la imitación de comportamiento de congéneres vecinos: un pájaro se echa a volar al ver que otros levantan el vuelo; el bostezo se propaga en una asamblea. La imitación puede ser directa (caso de los pájaros) o indirecta, como en las hormigas, que depositan en el suelo una sustancia química llamada feromona, dejando así un mensaje a otras hormigas de la colonia.

Una de las técnicas frecuentemente utilizadas por las hormigas es el reclutamiento de masa: un individuo que descubre por azar una fuente de alimento informa a sus congéneres de su descubrimiento depositando en el camino de regreso a la colonia una marca química transitoria. Esta pista sirve de guía a otros individuos. Estos, al ir a buscar el alimento descubierto, depositan a su vez la misma feromona, reforzando el marcaje de la pista que va del nido a la fuente de alimento. Este tipo de comunicación, que permite la amplificación de un hallazgo, es análogo al fenómeno de autocatálisis en química, en el



3. Para simular el comportamiento de forrajeo de las hormigas se utiliza un retículo cuyos nodos contienen unidades de feromona (en verde) *y de alimento* (en amarillo). *La intensidad del color es proporcional a la cantidad de alimento o de feromona presente. Al buscar la comida* (izquierda)*, las hormigas se desplazan al azar, con probabilidades particulares de avance en alguna de las dos direcciones posibles, o de permanecer donde están. En las pistas que van tomando dejan una leve señal (una unidad de feromona). En el camino de vuelta* (derecha)*, cada vez que pasan por un nodo, las hormigas depositan diez unidades de feromona*

cual el producto de una reacción química favorece su propia síntesis.

El reforzamiento de la señalización con feromonas de la pista más frecuentemente utilizada optimiza la recolección de alimento. Las hormigas de la colonia explotan sólo la fuente más próxima, al irse evaporando y tornarse imperceptible la traza conducente a las fuentes más alejadas (*véase la figura 1*).

Las hormigas legionarias, que viven en la pluviselva tropical, forman colonias de varios millares de individuos. Son casi ciegas y su comportamiento grupal se funda esencialmente en la utilización de pistas químicas. Cada día parten de cacería en expediciones que pueden llegar a contar 200.000 individuos; aportan al nido alrededor de 30.000 presas. Estas partidas de caza colectiva tienen una estructura espacial característica en cada especie, y son independientes de toda organización centralizada: las estructuras colectivas de caza son consecuencia de la repartición de las presas preferentemente depredadas y de comportamientos de seguimiento de pista. La parte superior de la figura 2 representa tres de estas estructuras de forrajeo. La especie *Eciton burchelli*, que se nutre de pequeños artrópodos dispersos por el medio ambiente, posee una estructura de forrajeo más difusa que la de la especie *Eciton hammatum*, que se nutre de colonias de insectos más localizadas. La especie *Eciton rapax*, cuyo régimen alimentario comporta presas de ambos tipos, posee una estructura de forrajeo intermedia. Se podría pensar que cada una de estas diversas estructuras está producida por comportamientos individuales diferentes y específicos, pero todas se reproducen por el mismo algoritmo sencillo de deposición de feromona y seguimiento de pista.

Hormigas en la red

Para simular el comportamiento cazador de las hormigas, hemos considerado que los individuos se desplazan de un nodo a otro a lo largo de un retículo bidimensional, depositando feromona a lo largo de todo el camino. Para tener en cuenta las observaciones etológicas hemos supuesto que el desplazamiento se produce sólo en un sentido, a saber, a partir del nido mientras no se descubre una fuente de aprovisionamiento, y de la fuente hacia el nido después. Al comienzo de cada intervalo temporal, la hormiga puede desplazarse hacia el nodo más cercano a su izquierda o su derecha, o permanecer donde está (*véase la figura 3*). La última posibilidad sirve para incorporar el comportamiento dubitativo de las hormigas de vanguardia en las zonas donde el marcado feromonal es débil.

Para simular el fenómeno operamos en dos tiempos. En un primer tiempo, evaluamos la probabilidad de que la hormiga se desplace hacia alguno de los nodos que tiene delante, o de que, por el contrario, permanezca donde está. A continuación, si la hormiga avanza, determinamos las probabilidades de que se encamine hacia el nodo de la derecha o el de la izquierda.

La probabilidad de que la hormiga avance hacia alguno de los dos nodos situados por delante depende de la cantidad de feromona depositada en estos nodos. En nuestro modelo hemos elegido que esta probabilidad p sea igual a $0{,}5 + 0{,}5 \tanh [((I + D)/100) - 1]$, donde tanh simboliza la función tangente hiperbólica (que suele estar programada en la mayoría de los lenguajes de programación y en las calculadoras de mano) y donde I y D son las cantidades de feromona presentes en los nodos izquierdo y derecho. Hemos elegido la función tanh con el propósito de que, cuando la concentración total de feromona en los nodos situados ante la hormiga sea nula, la probabilidad p sea igual a 0,5, mientras que esa misma probabilidad se aproxime a 1 cuando la concentración total de feromona sea grande.

Situada ya frente a dos nodos, marcados o no, ¿cómo saber si la hormiga se desplaza? En cada etapa

de la simulación, se toma al azar un número comprendido entre 0 y 1 y se le compara con la probabilidad p recién calculada: si el número elegido pertenece al intervalo $[0, p]$, la hormiga se desplaza; en caso contrario, se queda donde está.

En el primer caso, ¿hacia qué nodo se dirige? Naturalmente, las hormigas se desplazan hacia el nodo más marcado. Convendremos en que, si las hormigas se desplazan, irán hacia el nodo izquierdo con probabilidad p' igual a $(5 + I)^2/[(5 + I)^2 + (5 + D)^2]$; la probabilidad de que se encaminen hacia el nodo derecho es entonces igual a $1 - p'$.

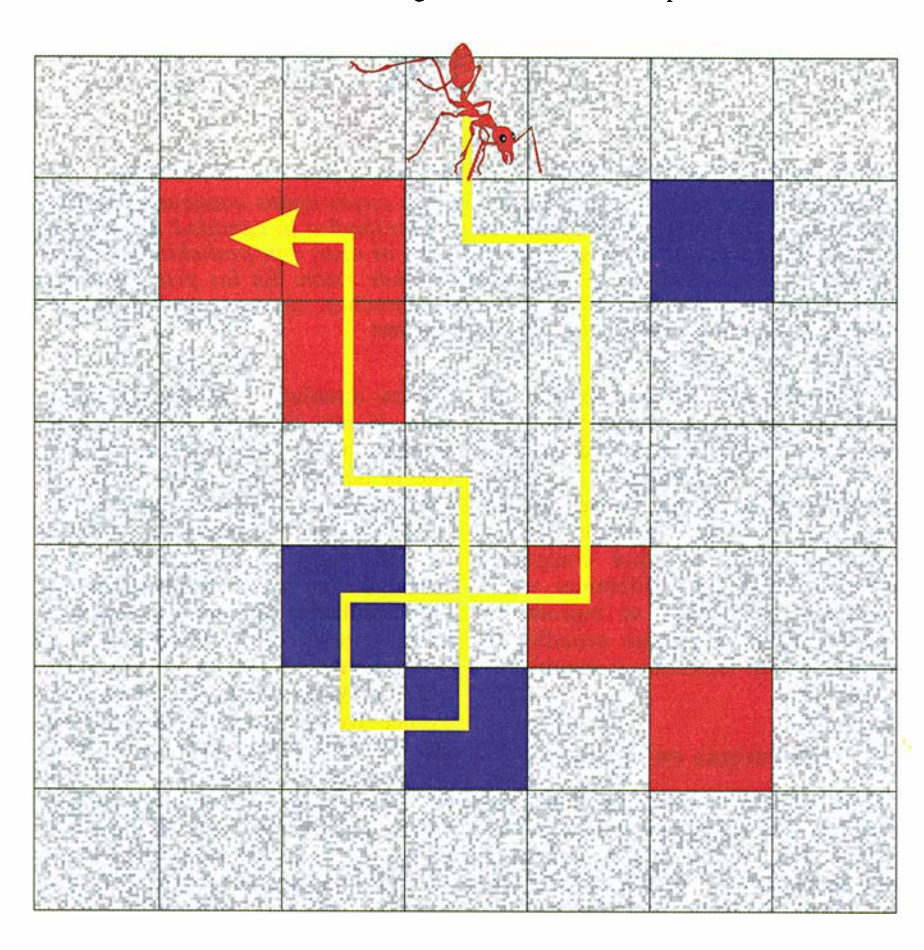
El número máximo de hormigas que pueden ocupar un mismo nodo es de 20; también por convenio, aceptaremos que las hormigas que avanzan hacia un nodo al alejarse del nido depositan una unidad de feromona en cada nodo que visitan, mientras la cantidad de unidades de feromona dejadas en él sea inferior a 300.

Cuando una hormiga encuentra alimento en un nodo, retorna al nido, reduciendo en una unidad la cantidad de alimento de ese nodo. En el camino de regreso, la hormiga se atiene a las mismas reglas que a la ida, pero depositando diez unidades de feromona en cada uno de los nodos que recorre mientras la cantidad de feromona allí depositada sea inferior a 1000 unidades. Por último, admitimos que en cada unidad de tiempo se evapora una treintava parte de la cantidad de feromona presente (se retira de cada nodo la correspondiente cantidad).

Los resultados obtenidos mediante este algoritmo se representan en la figura 2. Cada uno de ambos casos corresponde a una diferente repartición inicial del alimento. Si cada nudo de la red tiene una probabilidad 1/2 de contener una unidad de alimento (*véase la figura 2, abajo, a la derecha*), la pista central se bifurca muchas veces y forma una estructura en delta muy parecida a la constituida por *Eciton burchelli.*

Cuando las provisiones de alimento de los nodos son más importantes, pero más raras, se supone que cada nodo tiene una probabilidad 1/100 de contener 400 unidades de alimento: la estructura obtenida presenta varios subdeltas, que materializan las zonas de exploración densas. Esta última estructura se asemeja a la de la especie *Eciton rapax.* Con una probabilidad 1/10 de contener una unidad de alimento, la simulación haría aparecer un frente de exploración al que conduciría una pista central. Esta estructura sería análoga a la observada en *Iridomyrmex humilis* (una hormiga de la Argentina) cuando estas hormigas exploran un territorio desconocido. La simulación del comportamiento de *Eciton hammatum* no se ha representado, pues parece necesitar retículos muy grandes.

Las hormigas pertenecientes a cada una de las simulaciones desarrollan exactamente el mismo comportamiento; las distintas estructuras colectivas que se observan se deben a la interacción de un flujo de individuos que regresan de una fuente de aprovisionamiento con el flujo de los individuos que avanzan.

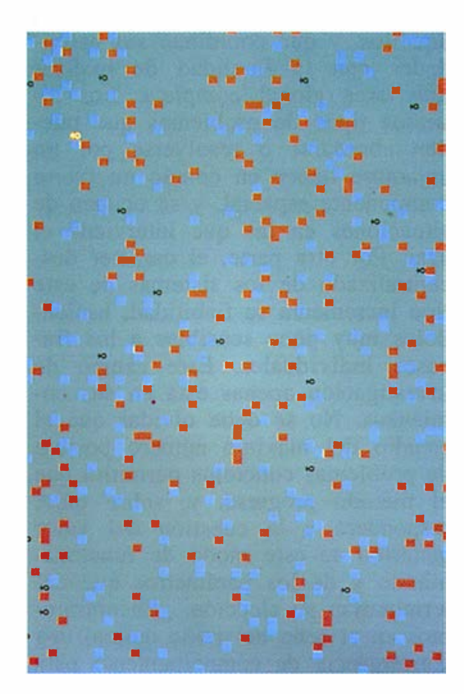
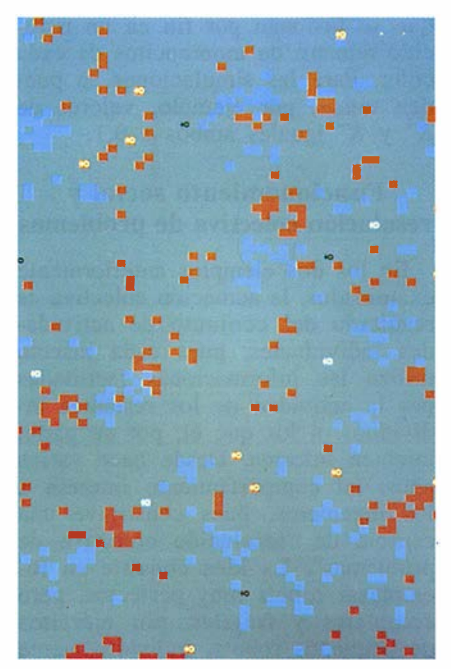
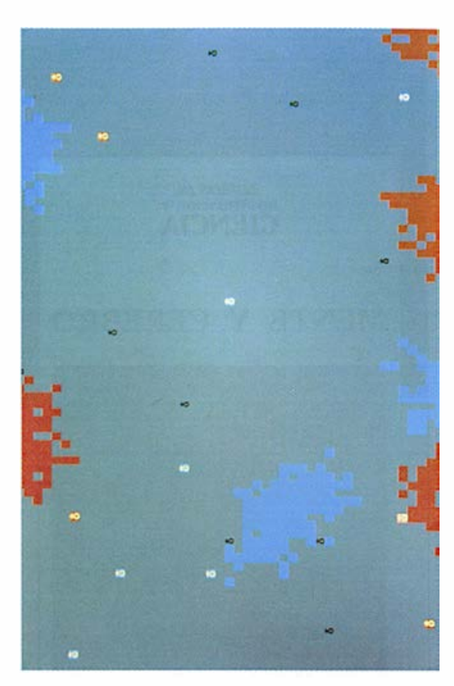


4. Simulación de una clasificación realizada por hormigas. Al principio, los bloques rojos y azules se encuentran dispersos al azar. Cada casilla puede contener un bloque como máximo, y sólo puede estar ocupada por una hormiga. Una hormiga no puede desplazarse a las casillas ocupadas por otras, ni atravesar tampoco el muro. Cuando una hormiga llega a una casilla que contiene un bloque, decide cargar con él o no, según la proporción de lugares vecinos ocupados por bloques del mismo tipo. En el caso aquí mostrado, la memoria de la hormiga, que registra los bloques con que anteriormente se ha encontrado, se ha representado en forma de hilera de casillas, debajo del cuadriculado principal. La probabilidad de tomar el bloque rojo que se encuentra en la cuadrícula recién ocupada es igual (según la fórmula dada en el texto) a $[0,1/(0,1 + 4/15)]^2$, o sea, 0,075, suponiendo que las constantes K^+ y K^- sean ambas iguales a 0,1

La ordenación de la carrocha

En el ejemplo anterior, la repartición de individuos con formación de una estructura espacial característica responde a la necesidad de buscar alimento eficazmente. Examinemos ahora la manera en que las hormigas organizan el espacio interior del nido para optimizar la eficacia de su trabajo.

La observación etológica indica que los diversos elementos de la carrocha (huevos, larvas y capullos o ninfas) son clasificados por las obreras y reagrupados, formando agregados con ellos. Esta selección puede resultar más precisa todavía y entrañar una clasificación de las larvas en

5. Simulación de la clasificación de un enjambre por hormigas. Los bloques azules y rojos, inicialmente dispersos, acaban agrupados al final

varias categorías, en función de su estado de desarrollo.

Este fenómeno se observa experimentalmente al vaciar el contenido del nido sobre una superficie: muy rápidamente, las obreras se afanan en reagrupar de nuevo y clasificar la carrocha. Se emprende esa clasificación sin previa comunicación directa entre las obreras. El modelo que proponemos para describir el proceso se inspira en la realidad biológica y bastaría por sí solo para explicar la clasificación; no se excluye, sin embargo, que intervengan simultáneamente otros mecanismos.

Para esta segunda simulación volveremos a suponer que las hormigas se desplazan por un espacio de dos dimensiones, en el cual se encuentran revueltos dos tipos de objetos, bloques azules y bloques rojos (*véase la figura 4*). Las hormigas se desplazan al azar por el retículo. Cuando una hormiga encuentra un objeto, se apodera de él con una probabilidad tanto mayor cuanto más aislado se halle éste; en consecuencia, todos los objetos aislados se recogen enseguida. Por otra parte, cuando una hormiga transporta un objeto de un tipo dado, lo deposita con una probabilidad tanto mayor cuanto más objetos hay de ese tipo en la vecindad inmediata; al irse depositando objetos al azar, se forma un pequeño agregado de objetos que va creciendo a medida que lo contornean las hormigas que transportan objetos del mismo tipo.

Inicialmente, hormigas y bloques están dispersos de forma aleatoria por la red. Cada casilla de la red contiene a lo sumo un bloque; en ningún momento puede haber en ella más de una hormiga. En cada unidad de tiempo, las hormigas se desplazan aleatoriamente una casilla en dirección norte, sur, este u oeste, a condición de que la casilla elegida no contenga ya otra hormiga o sea una pared del nido, que delimita así el universo del desplazamiento. El orden en que intervienen las diversas hormigas es aleatorio y diferente en cada unidad de tiempo.

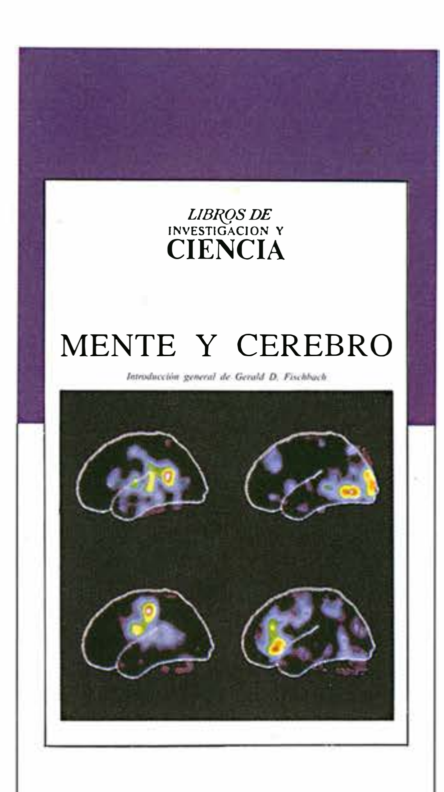
Cuando una hormiga se desplaza a una casilla que contiene un bloque, si no va cargada se apodera del bloque con una probabilidad p igual a $(K^+/(K^++f))^2$, siendo f la proporción de lugares vecinos ocupados por un objeto del mismo tipo, y K^+, una constante. Una hormiga puede probablemente estimar el valor de f por la concentración local de olor asociado a cada uno de los elementos de la carrocha, o tal vez, también por medio de una exploración táctil.

Esta información les es facilitada a las hormigas de la simulación dotando a cada una de ellas de memoria a corto plazo. Desde el punto de vista de los mecanismos y sistemas fisiológicos, la memorización biológica difiere, sin duda, de la utilizada por nosotros, pero ambas desembocan en reacciones similares. Esta memoria le permite a la hormiga registrar los elementos que se ha encontrado en los desplazamientos correspondientes a los 15 últimos pasos de tiempo.

Por ejemplo, la memoria interna de una hormiga puede contener la cadena 00RA0AARA00A0R0, que significa: a lo largo de los 15 últimos intervalos de tiempo, la hormiga ha encontrado tres bloques rojos y cinco bloques azules y todas las demás casillas por las que pasó estaban vacías. En este caso, el valor de f es igual a 0,2 (3/15) para los bloques rojos y a 0,333 (5/15) para los bloques azules. Cuando la hormiga vuelva a desplazarse, olvidará la naturaleza del primer elemento de esta cadena y memorizará el nuevo objeto hallado.

Sea cual fuere su decisión de tomar o dejar el bloque, la hormiga prosigue su desplazamiento aleatorio por el casillero. Si está transportando un bloque, cada vez que llega a un cuadro ha de decidir si lo deposita allí o no. Cuanto más numerosos sean los objetos del mismo tipo en el vecindario inmediato, más aumenta la probabilidad p' de depositar el objeto transportado; por este motivo, nosotros utilizamos una ley de probabilidad p' igual a $[f/(K^-+f)]^2$, siendo K^- una constante menor que 1. La probabilidad aumenta con f, pasando desde 0 cuando f es nula hasta 1/4 cuando f es igual a K^- y sigue aumentando cuando f tiende hacia 1.

La figura 5 representa tres etapas de una simulación en la cual una colección de bloques rojos y azules aleatoriamente dispersos en el ambiente se reagrupan rápidamente en pequeños agregados rojos y azules



que se fusionan por fin en un reducido número de montoncitos de cada color. Para las simulaciones se pueden tomar, por ejemplo, valores de K^+ y K^- iguales ambos a 0,1.

Funcionamiento social y resolución colectiva de problemas

En los dos ejemplos anteriormente examinados, la actuación colectiva es resultado del conjunto de actividades individuales, pues cada insecto utiliza las informaciones facilitadas por la actividad de los restantes individuos, a los que él, por su parte, también informa. Desde hace varios años, tal comportamiento interesa a los ingenieros, pues constituye una especie de "resolución colectiva de problemas". La idea consiste en reemplazar robots muy perfectos, pero complejos y frágiles, por ejércitos de pequeños robots, individualmente simples, aunque colectivamente robustos.

Las colonias de insectos han de afrontar situaciones problemáticas, como la elección del camino más corto entre el nido y una fuente de aprovisionamiento; se considera que las estructuras cooperativas que caracterizan la actividad global de sus colonias constituyen soluciones colectivas a los problemas planteados. Nuestros análisis tratan de determinar cuáles son las propiedades (tipos de interacción y de programas de comportamiento) condicionantes, para las unidades activas, de la eficacia de la resolución, y la forma en que los factores ambientales regulan la solución que termina por adoptarse.

Nuestros estudios muestran que las colonias convergen hacia una solución adaptada al problema, mientras que cada individuo no tiene acceso más que a una parcela de información estrictamente local, y no conseguiría por sí solo resolver el problema solucionado por la colonia. Esta forma de resolución repartida se efectúa sin que la colonia utilice ninguna representación simbólica del territorio donde opera, procediendo contrariamente al humano, que se construye un plano del ambiente en que se desenvuelve con el propósito de programar sus investigaciones.

Para caracterizar el modo de funcionamiento colectivo peculiar de las colonias de insectos hemos examinado aquí la noción de "inteligencia en enjambre", que consiste en la capacidad de un grupo de agentes naturales o artificiales cuyas reglas de comportamiento son bastante sencillas, fundadas en informaciones locales, dispersas por el ambiente de aquéllos, y que coordinan sus actividades con la finalidad de realizar una tarea global compleja. Los diversos tipos de problemas que pueden abordarse o resolverse por un enjambre tienen en común un fuerte componente espacial, y se ocupan de situaciones en las que interviene el azar. Por otra parte, el carácter descentralizado de los sistemas de este tipo incrementa su fiabilidad, haciéndolos muy poco sensibles a los fracasos individuales. Este campo de investigación apenas está en sus comienzos. No se debe olvidar que el estudio del máximo número posible de problemas concretos permitirá que el método progrese, y, sobre todo, responderá a la cuestión del valor genérico de este modo de funcionamiento y de los parámetros que determinarían su elección. ¿Encontraremos en el seno del reino animal una convergencia de comportamiento para especies filogenéticamente muy alejadas, pero que han de enfrentarse a problemas similares? Cuando el problema planteado es la construcción de estructuras muy grandes con respecto al tamaño de los individuos, ¿se observa el mismo comportamiento en especies diferentes?

Volvemos así a las preguntas que habíamos planteado al principio del artículo, como las concernientes a las diferencias sociales-solitarias. Quizás en el pasado las hayamos contrapuesto excesivamente, y la frontera no se encuentre tal vez determinada por el número de agentes, sino por la naturaleza de la tarea y el número de acciones a efectuar. Los ejemplos que aquí hemos considerado nos hacen ver que el comportamiento colectivo puede ser consecuencia de instrucciones individuales relativamente simples.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE BLIND LEADING THE BLIND: MODELLING CHEMICALLY MEDIATED ARMY AND RAID PATTERNS. J.-L. Deneubourg, S. Goss, N. Franks y J.-M. Pasteels, en *Journal of Insect Behavior*, vol. 2, páginas 719-724, 1989.

COLLECTIVE PATTERNS AND DECISION MAKING. J.-L. Deneubourg y S. Goss, en *Ethology, Ecology and Evolution*, vol. 1, págs. 295-311, 1989.

SWARM MADE ARCHITECTURE. J.-L. Deneubourg, G. Theraulaz y R. Beckers, en *Towards a Practice of Autonomous Systems, Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*, páginas 122-133, MIT Press, 1992.

INTELLIGENCE COLLECTIVE. Dirigido por E. Bonabeau y G. Theraulaz, Editions Hermès (*en prensa*).

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Un examen en profundidad de los sistemas electorales, todos ellos imperfectos. ¿Resulta posible una adaptación fraudulenta de un sistema?

Penélope, la secretaria particular del presidente Pucherazo, estaba intranquila.

"Señor Presidente, los efectos de los movimientos demográficos me tienen preocupada."

"¿Y eso por qué?", quiso saber el presidente.

"Amo y señor, recuerde usía que la junta central la forman cinco diputados, elegidos por tres distritos. Y que el número de diputados asignado a cada distrito depende del número de electores inscritos en él."

"Así es, sí."

"Y recuerde asimismo que estos tres distritos son Ricalana, Candela y Maraver."

Pucherazo consultó el mapa de Votanbloque que colgaba de una de las paredes de su despacho.

"Su antecesor estableció los límites de los distritos. La Constitución de Votanbloque fija en cinco el número total de diputados. No podemos cambiarlo."

"¡Lástima, lástima, lástima!"

"Por el momento, Ricalana tiene tres escaños, mientras que los distritos de Candela y Maraver cuentan con uno cada uno."

"Y usted teme que una parte de los habitantes de Ricalana se trasladen a los otros dos distritos."

"No, buen amo, la población de Ricalana se mantiene invariable. Lo que me desazona es que hay habitantes de Maraver que se han trasladado a Candela."

"¡De mucho les va a servir! Allí no hay subvenciones. Y con eso no va a disminuir el poder de Ricalana..."

"Pues la verdad es que sí. Esa es una de las paradojas de la asignación de escaños. Estas paradojas son consecuencia de que los números de escaños han de ser enteros: no se puede asignar medio escaño. Ahora bien: hasta el presente había 480.000 inscritos en Ricalana, 310.000 en Candela y 310.000 en Maraver."

El método de los divisores

La Constitución especifica que los cinco escaños de la junta electoral han de ser asignados por el método de los divisores. Sean p_1, p_2, p_3 las poblaciones de los distritos. Se elige un número d, llamado divisor, tal que la suma de las partes enteras de p_1/d, p_2/d, y de p_3/d sea igual a 5. Cada distrito posee un número de escaños igual a la parte entera del cociente de dividir su población entre d.

"¿Depende el resultado de la elección del divisor d?"

"Entre ciertos límites, no. Una variación de d puede hacer que la suma de las partes enteras ya no sea 5. Pero cuando la suma es cinco, la elección de d resulta indiferente."

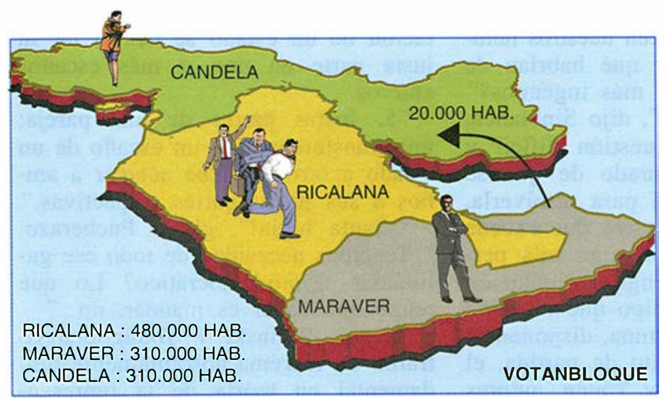
"¡Menos mal!"

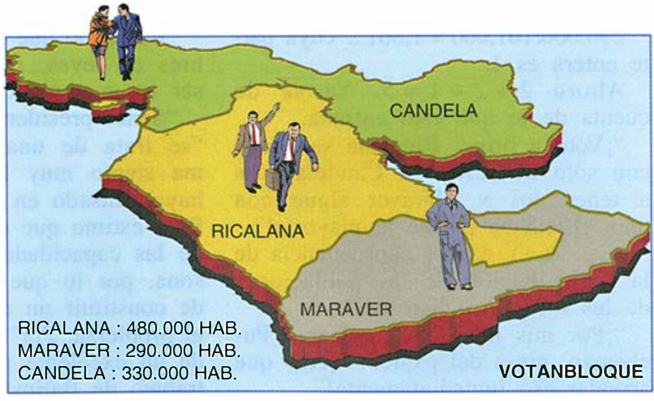
"En nuestro caso, p_1 es igual a 480.000 y tanto p_2 como p_3 valen 310.000. Elegimos el número d igual a 160.000; entonces $p_1/d = 3$, y $p_2/d = p_3/d = 1{,}9375$, con lo que la parte entera de cada uno (máximo entero que es menor o igual que el número de que se trate) es 3, 1, 1 respectivamente. La suma $3 + 1 + 1$ cumple la condición de ser igual a 5, por lo que $d = 160.000$ es un divisor aceptable. En consecuencia, nuestros distritos poseen, respectivamente, 3, 1 y 1 escaños. Todo divisor d comprendido entre 155.000 y 160.000 proporciona el mismo resultado."

Pucherazo admiró la impecable lógica.

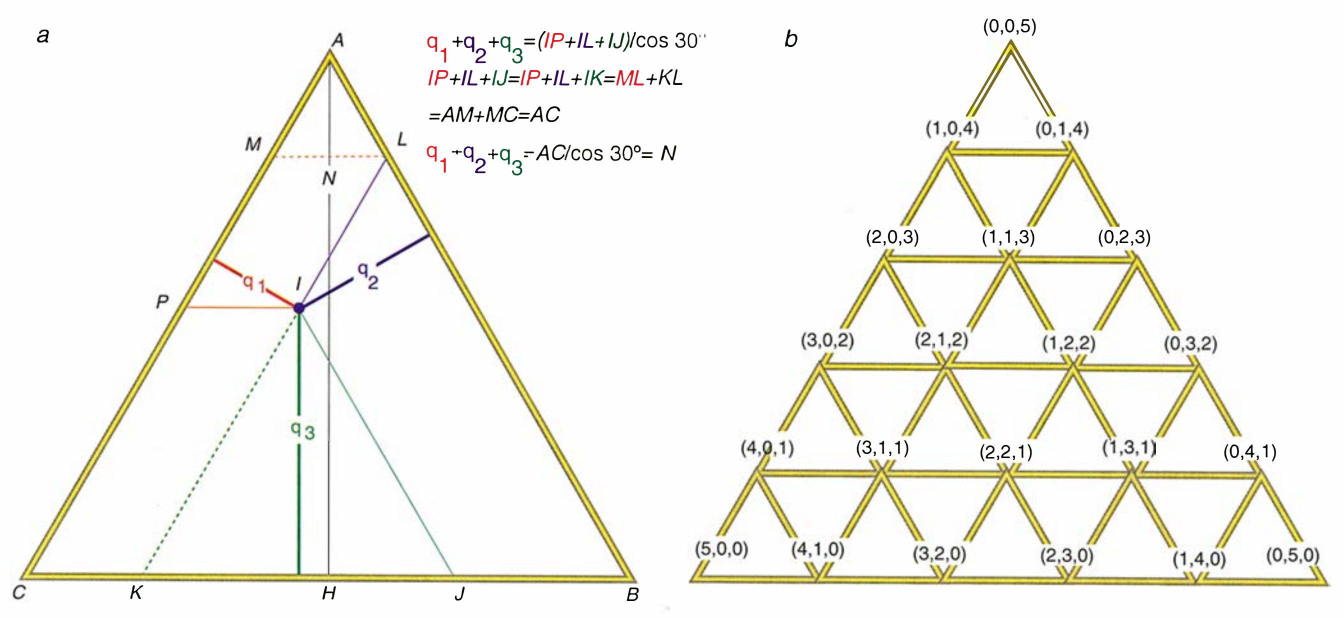
"¡Muy bien tramado! Ricalana tiene menos habitantes que los otros dos distritos juntos, pero éstos sólo cuentan con dos escaños... ¡mientras que Ricalana tiene tres!"

"Y por consiguiente, nosotros sólo tenemos que preocuparnos del bienestar de los habitantes de Ricalana. Bien. Este año, 20.000 habitantes de Maraver se han trasladado a Candela. Las cifras son ahora: Ricalana,





1. Votanbloque consta de tres distritos: Ricalana, Candela y Maraver. Los diputados son asignados por el método de los divisores. Aunque la población de Ricalana no cambia, el traslado de 20.000 habitantes de Maraver a Candela hace perder un diputado a Ricalana



2. *"Coordenadas" en un triángulo equilátero: como demuestra la figura, la suma de las distancias q_1, q_2 y q_3 es constante* (a). *Los puntos que representan ternas de enteros cuya suma es el número total de escaños disponibles forman una red hexagonal* (b)

480.000 habitantes; Candela, 330.000 y Maraver, 290.000. Como podemos ver, la población de Ricalana y la población total de los otros dos distritos se mantienen invariables."

"Ya me he dado cuenta."

"Pero en el momento actual, el divisor 160.000 ya no es adecuado."

"¿Por qué razón?"

"¡Está claro! 480.000/160.000 sigue valiendo 3, pero 330.000/160.000 es igual a 2,0625 y 290.000/160.000 es igual a 1,8125; las partes enteras de estos dos números son 2 y 1, y ahora 3 + 2 + 1 es igual a 6, lo que es excesivo."

"¡Lo que faltaba...!"

"Nos hace falta un divisor ligeramente mayor. Probemos con d = 161.000:

480.000/161.000 = 2,981... cuya parte entera es 2.

330.000/161.000 = 2,049... cuya parte entera es 2.

290.000/161.000 = 1,801... cuya parte entera es 1.

Ahora 2 + 2 + 1 = 5. Ya se da cuenta de lo que esto entraña..."

"¡Voto a bríos! Ricalana se queda con sólo dos escaños, Candela pasa a tener dos y Maraver sigue con uno. ¡Ricalana pierde la mayoría!"

"Eso es. Y eso es consecuencia de la redistribución de las poblaciones de los otros dos distritos."

"¡Por mis muertos!", exclamó Pucherazo, presa del pánico. "¡Hay que arreglar eso inmediatamente!"

"Pero, mi buen amo, las fronteras de los distritos están determinadas por la Comisión de demarcaciones y el número total de diputados ha sido establecido en cinco por la Constitución."

"De acuerdo, no puedo cambiar esos números, pero sí puedo organizar una junta electoral *ad hoc* y preparar un método de reparto que me sea más favorable."

"El profesor Sinblanca, de los nuestros, podrá resolverlo."

Una hora más tarde, una limusina del Departamento del Interior se detenía con chirrido de frenos ante el Palacio Social del Pueblo (P.S.P.) y Angel Sinblanca entraba agazapado entre guardaespaldas en el edificio. Penélope le explicó su tarea.

"Es un problema complicado", exclamó Sinblanca. "No obstante, creo atisbar una solución. Por fortuna, hay un buen número de trabajos que ya han explorado la cuestión."

"No le diga eso al presidente, o no aflojará los cordones de la bolsa."

"Pero, ¿eso es ético?"

"Eso es lo que hacen nuestros hombres de leyes. ¿Por qué habrían de ser los matemáticos más ingenuos?"

"Señor presidente", dijo Sinblanca, "se trata de una cuestión difícil y me siento muy honrado de que se haya pensado en mí para resolverla. Pero estimo que es tarea que excede de las capacidades de una sola persona, por lo que tengo la intención de constituir un equipo que resuelva el problema. Por fortuna, disponemos de un excelente punto de partida, el trabajo de Balinski y Young, autores del libro *Representación equitativa.*"

"Me parece que esos pavos no suelen votarme", rezongó Pucherazo.

"El subtítulo es: *Hacia el ideal: un hombre, un voto.*"

"Yo hubiera preferido "una persona, un voto", terció Penélope.

"Haga el favor de guardarse sus reflejos paleofeministas para los mítines electorales, Penélope. Estamos hablando de cosas serias..."

"Balinski y Young enumeran las cinco propiedades básicas de un sistema de representación ideal", dijo Sinblanca. "Helas aquí:

"1. Covariancia con la población: ningún estado cuya población crece ha de ceder escaños a estados cuya población decrece.

"2. Imparcialidad: el promedio de lo recibido por cada estado al correr el tiempo es su justa parte.

"3. Covariancia relativa: cuando crece el número total de estados, con poblaciones fijas, ninguno de los estados pierde escaños.

"4. Justa parte: ninguna representación de un estado se desvía de su justa parte en uno o más escaños enteros.

"5. Justas partes de una pareja: una transferencia de un escaño de un estado a otro no debe acercar a ambos a sus justas partes respectivas."

"¡Santa logia!", gimió Pucherazo. "¿Tenemos necesidad de todo ese galimatías criptodemocrático? Lo que tengo que hacer es mandar, no..."

"Señor, Balinski y Young demostraron un teorema absolutamente fundamental en teoría de la representación. Supongamos que desea usted poner a punto un sistema que posea las cinco propiedades requeridas."

"¡Pero es que no quiero!", suspiró Pucherazo.

Angel Sinblanca hizo oídos sordos. "Pues bien, señor presidente, tal pretensión es imposible. Las cinco propiedades son incompatibles."

"¿Y eso es lo que han demostrado esos reaccionarios de Balinski y Young?"

"Sí, señor presidente."

"Mi estimación por ellos ha subido un poquitín. Pero, ¿a qué nos lleva todo esto, amigo Sinblanca?"

"Ello demuestra que nos enfrentamos a un problema verdaderamente interesante. Puesto que no existe un sistema perfecto, hemos de llegar a un acuerdo transaccional."

"Eso es lo que estaba deseando oír", dijo Pucherazo. "Las componendas, los cuchareos, eso es lo que me va. Penélope le mostrará cuáles son nuestros objetivos y le ayudará a poner en marcha la Comisión Sinblanca. ¡Al trabajo!"

El tránsfuga inocente

Varias semanas después, la Comisión Sinblanca celebraba su primera reunión. El profesor había reunido un pequeño grupo de trabajo integrado por él mismo y tres colegas: Brunilda Mechaslargas, Pascual Quettal y el inevitable estudiante sin un céntimo, Gerardo Finamano.

"Desde luego, todas las dificultades son debidas al tránsfuga inocente", dijo Gerardo.

"En efecto. ¿En el método Jefferson?", preguntó Mechaslargas.

"Exactamente."

"Haga el favor de recordarnos todo esto", pidió Quettal.

"En 1792, el Congreso estadounidense votó la adopción de un nuevo método de representación inventado por Alexander Hamilton. Pero George Washington ejerció por primera vez el derecho presidencial de veto para sustituirlo por otro método preconizado por Thomas Jefferson. Se trata de una técnica con divisor. Supongamos que haya N escaños a repartirse entre r estados, de poblaciones p_1, ..., p_r. Se elige entonces un divisor d tal que si $x_j = [p_j/d]$, donde $[u]$ designa la parte entera del número u, se tenga la igualdad $x_1 + ... x_r = N$. A continuación se le otorgan x_j escaños al estado de índice j."

"Ya me acuerdo", dijo Quettal.

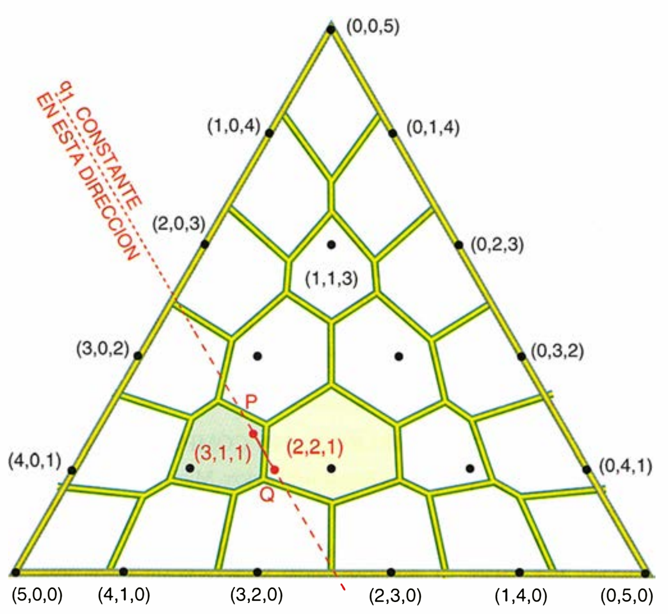
"Hay una forma muy interesante de representar geométricamente lo que sucede", prosiguió Gerardo. "Se basa en que, al considerar en el plano tres ejes que formen ángulos de 120 grados, la suma de las 'coordenadas' siempre es constante. Si tenemos tres poblaciones p_1, p_2, p_3, la población total será $p = p_1 + p_2 + p_3$. Y si tenemos que repartir N escaños, la repartición ideal consistirá en asignarle al j-ésimo estado su cuota $q_j = Np_j/p$, lo que equivale a calcular la proporción p_j/p que constituye en la población total, y multiplicar esta proporción por el número total de escaños. Entonces $q_1 + q_2 + q_3 = N(p_1 + p_2 + p_3)/p = N$. Por desgracia, los q_j han de ser números enteros. Pero de eso hablaremos más adelante.

"Representaré geométricamente la terna (q_1, q_2, q_3) mediante las distancias a los tres lados de un triángulo equilátero (*figura 2a*). Las distribuciones a considerar son las ternas (N_1, N_2, N_3) de enteros cuya suma es N: forman un retículo triangular en el interior del triángulo (*figura 2b*). El problema consiste entonces en repartir el triángulo en regiones, una por cada uno de los vértices de la red. Si la terna de cuotas (q_1, q_2, q_3) se encuentra en una de estas regiones, entonces la representación resultante habrá de ser el nudo de la red perteneciente a esta región."

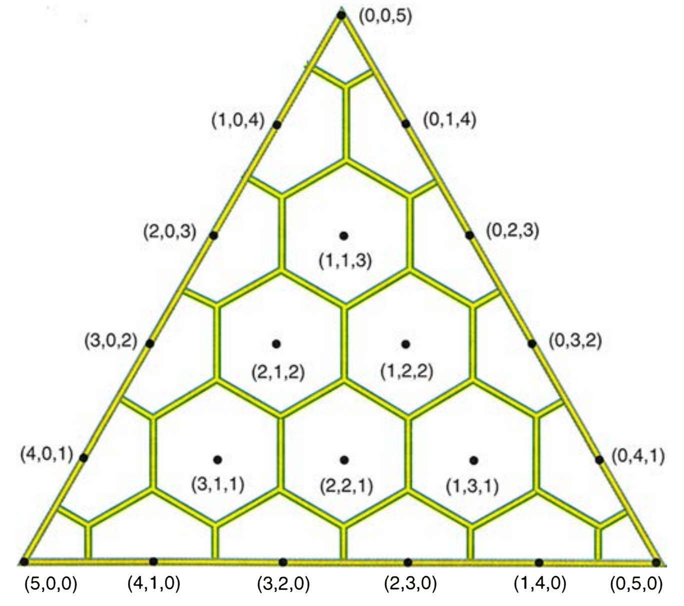
"Ya veo", dijo Sinblanca. "Se da por supuesto que si las cuotas son enteras, definirán automáticamente la representación correcta."

"Es razonable", opinó Mechaslargas.

"Desde luego", continuó Gerardo. "En la representación gráfica de las regiones según el método Jefferson, se obtiene un retículo de hexágonos deformados, con pentágonos a lo largo de los lados del triángulo y cuadriláteros en los vértices. La paradoja del tránsfuga inocente, que tanto inquieta a Penélope, se debe a que los segmentos de rectas paralelas al lado derecho del triángulo —lo que



3. La paradoja del tránsfuga inocente, ilustrada para el método de Jefferson. Un desplazamiento a lo largo de un segmento de recta representa una migración en la cual la población p_1 (y, por tanto, la cuota q_1) del estado número 1 permanece constante. La migración puede reducir el número de escaños asignados. Aquí, la migración de P a Q reduce de 3 a 2 el número de escaños del estado 1



4. La geometría del método de Hamilton. También aquí, en las regiones hexagonales que rodean un punto, los números de escaños están determinados por la terna asociada a las coordenadas del punto central. Nos damos cuenta enseguida, por geometría, de que este método de Hamilton sufre del mismo defecto (la paradoja del tránsfuga inocente) que el método de Jefferson

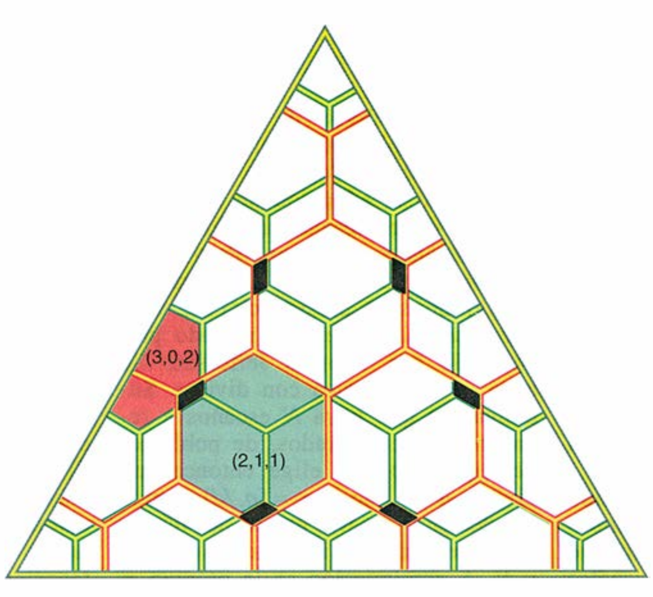
representa, pues, cambios de población con p_1 constante (y también q_1 constante, por lo tanto)— nos llevan de una región asociada a un valor particular de N_1 a otro valor donde N_1 es inferior (*figura 3*)."

"Ya veo. Queda claro en la figura", hizo notar Sinblanca.

"Obviamente, sólo se tiene un triángulo en el caso de que los estados sean tres. De ser cuatro, la región correspondiente sería un tetraedro, que quedaría dividido en poliedros. Y de ser los estados cinco o más penetraríamos en el reino de los espacios de más de tres dimensiones. Por fortuna, en nuestro caso hay tres estados y las figuras ponen de manifiesto los efectos paradójicos."

"En efecto. Como puede verse, el método de Jefferson no funciona. Nos hace falta otro."

"Exactamente. El Congreso estadounidense abandonó el método de Jefferson y lo sustituyó por el Hamilton, pasando por encima del veto de Washington."



5. La paradoja de Alabama. El diagrama del método de Hamilton en el caso N = 4 está recubierto por el diagrama correspondiente a N = 5. Para las poblaciones de las regiones negras, al pasar de 4 a 5 el número de escaños, un estado perderá un escaño. Así, la región verde representa una repartición (2, 1, 1), la naranja, una repartición (3, 0, 2). Para las poblaciones de su intersección (en negro), *la representación del estado 2 pasará de un escaño a cero cuando Alabama se una a la Confederación*

El método de Hamilton

La descripción que hace Hamilton es: "Se hallan las cuotas y se atribuye a cada estado el número de escaños igual al mayor entero contenido en su cuota. Los escaños todavía no asignados son atribuidos a los estados que posean mayores restos." Este procedimiento conduce a un nuevo diagrama formado por hexágonos regulares (*figura 4*).

"Pero este método sigue sufriendo la paradoja del tránsfuga inocente", dijo Mechaslargas. "Como las fronteras no son paralelas a los lados del triángulo, sus segmentos zigzaguean y cortan a las rectas representativas de una determinada cuota. Cuando el punto que representa la población corta a uno de tales segmentos, por ejemplo, con q_1 constante, resulta que los escaños atribuidos al estado 1 pueden disminuir en una unidad."

"Lo ha entendido perfectamente. Y no es éste el único inconveniente del método de Hamilton: tenemos también la histórica paradoja de Alabama. Si un nuevo estado engruesa la Unión, sin variar las poblaciones de los demás, puede ocurrir que uno de los estados de origen pierda un escaño (*figura 5*)."

"Entonces el método de Hamilton tampoco es ideal."

"No. En realidad, ningún método lo es. Ese es el mensaje de Balinski y Young. Lo que falta es elegir el compromiso más adecuado."

Sinblanca deseaba complacer al presidente.

"¿Qué resultados proporciona el método de Hamilton aplicado a nuestras poblaciones?"

Gerardo torció el gesto.

"Veamos... Ricalana tiene 480.000 habitantes, Candela, 330.000 y Maraver, 290.000. La población total es pues de 1.100.000, de suerte que las cuotas son: Ricalana: 5 × 480.000/110.0000 = 2,1818...; para Candela: 1,5 y para Maraver, 1,31818... Luego las partes enteras son 2, 1, y 1, y queda un escaño por atribuir. El distrito de mayor resto es Candela, que gana por ello el escaño sobrante, y el reparto final queda así: Ricalana, 2 escaños, Candela 2 y Maraver 1."

"Gerardo, no es exactamente eso lo que desea el presidente."

"¡Habría que usar otro método!"

"Recuérdanos, por favor, los otros métodos."

"Es usted exigente, Quettal. Pero con ese nombre... Está el método de Adam", dijo Gerardo, "propuesto por John Quincy Adams. Se parece al de Jefferson, salvo en que cuando algunos de los números p_1/d, p_2/d y p_3/d no son enteros se los reemplaza por el mínimo entero mayor que ellos, en lugar de minorarlos por su parte entera."

"¿Y qué daría ese método en nuestro caso?"

"Verá, profesor. Si tomamos $d = 300.000$, entonces $p_1/d = 1{,}6$; $p_2/d = 1{,}1$ y $p_3/d = 0{,}9666...$ que serían reemplazados por 2, 2, 1. Este es también el resultado que se obtiene con el método de Hamilton."

"Y con el de Jefferson...", dijo Mechaslargas con aire soñador.

"¡Ah, sí! Esto deja poco margen para el compromiso, pero encierra la verdad", señaló secamente Sinblanca.

"Me temo que tengamos la suerte en contra", murmuró Quettal.

"¡Amigos, acabo de inventar el método Sinblanca! Dividamos las poblaciones por $d = 170.000$ y tenemos:

"Ricalana: 2,82...

"Candela: 1,94...

"Maraver: 1,70...

"Si ahora utilizamos el método de Hamilton los estados reciben respectivamente 2, 1 y 1 escaños.

"¡Pero la suma no es igual a 5!"

"No, Gerardo, me doy perfecta cuenta. Mi sugerencia es que, por el bien de la democracia, creemos en la junta electoral un escaño especial, al que bautizaremos 'escaño del pueblo'. Utilizaremos el método de Hamilton para la asignación de cuatro escaños, y después atribuiremos el escaño del pueblo al azar, sacándolo a la suerte."

"¡Pero, bueno...!", se asombró Mechaslargas. "De esa forma, Ricalana sólo tiene una probabilidad entre tres de conseguir el tercer escaño."

Sinblanca esbozó una sonrisa cínica.

"¡Querida amiga, el presidente Pucherazo sabe organizar el azar!"

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FAIR REPRESENTATION: MEETING THE IDEAL OF ONE MAN, ONE VOTE. M. L. Balinski y H. P. Young. Yale University Press, Newhaven, Connecticut, 1982.

A GEOMETRICAL VIEW OF SOME APPORTIONMENT PARADOXES. Brent A. Bradberry, en *American Mathematical Monthly*, vol. 65, n.º 1, págs. 3-17; febrero de 1992.

THE MATHEMATICAL THEORY OF THE APPORTIONMENT OF REPRESENTATIVES. Edward V. Huntingdon, en *Proceedings of the National Academy of Science USA 7*, páginas 123-127, 1921.

Libros

Emiliano Aguirre, Luis Alonso y Antonio Prevosti

Ciencia española

Del XVIII

EL MEGATERIO DE BRU Y EL PRESIDENTE JEFFERSON, UNA RELACIÓN INSOSPECHADA EN LOS ALBORES DE LA PALEONTOLOGÍA. José María López Piñero y Thomas F. Glick. Instituto de Estudios Documentales e Históricos sobre la Ciencia; Valencia; 1993.

La figura del dibujante y taxidermista en los comienzos del Real Gabinete de Historia Natural de Madrid, Juan Bautista Bru, el interés y conocimiento sobre fósiles de su contemporáneo Thomas Jefferson y el gran megaterio americano que los hizo conocedores al uno del otro proporcionan una grata y oportuna lectura con un feliz tratamiento. La curiosa anécdota histórico-científica viene precedida de una exposición casi exhaustiva de los casos de interés por el conocimiento de la naturaleza americana y por los fósiles en España desde antes del XVIII, y se enmarca en el contexto de la ciencia paleontológica. Se sigue con gusto la trayectoria del megaterio, desde los primeros pasos, bien dados por el fraile ilustrado, en la excavación, comparación y empaquetado, y por el embajador hasta la llegada al Real Gabinete. Los autores valoran los primeros trabajos, localizan las fuentes de errores y señalan la pérdida de pistas y de referencias.

Se ve claro que fue difícil para la inteligencia de los ilustrados del XVIII el parto de la paleontología. Varios conceptos no acertaban a formularse. No era tanto la fe o la religión la que obstruía. Sabían anatomía, todos. Lo mismo Bru que Jefferson, Carmichael y el autor de la primera nota de 1788, supuestamente el padre Manuel de Torres, comparan aquellos huesos con los del elefante, el rinoceronte, el hipopótamo; ven las diferencias, se extrañan de que mamíferos de esa talla tengan uñas de garra, y hacen consideraciones totalmente pertinentes de morfología funcional y ecología. Pero ninguno se atreve a pensar en "especie animal extinguida", en *otras* formas de vida y *otras* faunas en *otros tiempos* —sobre todo esto último. Jefferson es refractario a la idea de extinción: las especies que se van conociendo por fósiles perviven confinadas en alguna región inexplorada.

El caso del megaterio aparece como ejemplo de una contradicción estructural que afectó negativamente al desarrollo y eficacia del potencial científico en la España de hace dos siglos. Hay científicos capaces. Bru es capaz. No sólo es un buen dibujante y excelente taxidermista. Es número uno cuando hace una doble reconstitución didáctica del elefante indio en el Real Gabinete, montando sobre una peana una naturalización con la piel y en otra el esqueleto. Lo es cuando monta, el primero, un esqueleto de animal vertebrado desconocido con los huesos que recibe empaquetados desde el otro lado del océano; versado en anatomía, su descripción de cada pieza es rigurosa. No obstante, la descripción de Bru no se publicó antes que la de Cuvier, ni fue aquel, u otro científico ("profesor") del Real Gabinete o de la universidad española quien interpretó y dio nombre al nuevo género fósil.

Nuestros autores pasan por alto lo mal que se llevaban Clavijo y Bru: muy complejo el carácter del primero; duro y difícil el segundo que, no sin alguna razón, aspiraba a más. Los huesos fósiles llegan en 1788, y no tarda Bru en describirlos y dibujarlos. Lo justo para que ya en 1789, Carmichael comunique el caso a Jefferson, con medidas osteométricas y un dibujo, si bien anotando la salvedad del "uso exclusivamente personal" de la noticia, aún inédita: a la sensibilidad y al interés científico unía la ética.

El diplomático francés Roume da muestra de lo primero al llevarse los escritos y dibujos de Bru el mismo año con prisa para entregarlos al joven Cuvier; logra con ello la prioridad de la publicación científica. A Garriga le llaman tarde, y éste aparece algo confuso ante la celeridad y el paso firme que va adquiriendo el progreso de la nueva ciencia, y la atención que se le dedica en otros países. La integración de la mentalidad, el método, incluso la personalidad científica, concretamente de paleontólogo, en el político y presidente Jefferson, resalta en el libro de López Piñero y Glick como un hecho paradigmático.

Bru era conocido e interesante para Jefferson, esto, además del título, es el mensaje clave del libro. López Piñero y Glick recuerdan cómo autoridades del gobierno británico solicitaron una réplica en escayola del esqueleto del megaterio. No cuentan cómo desde París se reclamó el propio esqueleto, tipo de esta especie, a las autoridades del Museo de Ciencias Naturales diciéndoles que sabían la existencia de otro esqueleto en los almacenes.

Cabe comentar que en los apéndices de esta obra con textos y dibujos de los primeros tiempos se usan fuentes bibliográficas, pero no se estudian, ni sacan a la luz fuentes documentales, que los autores tenían a mano. Al Real Gabinete de Historia Natural de Madrid se dedican dos de los nueve capítulos de este libro, pero los autores no visitan su archivo; también se les escapan datos no irrelevantes de la identidad de esta institución. El Real Gabinete de Historia Natural de Madrid se fundó en 1772, no en 1753, por Carlos III y no por Fernando VI, y su primer director fue Pedro Franco Dávila, no Ulloa. El gabinete que fundó Fernando VI, con Ulloa, en 1753, era la Real Casa de la Geografía y Gabinete de Historia Natural que no llegó a definirse y se desmembró antes de estar estructurada. El Real Gabinete de Carlos III y Pedro Dávila es objeto de nueva fundación, estructurada y documentada. Por otra parte, en los años de referencia, 1788 a 90, Clavijo no era "bibliotecario". En cuanto a Bru, las planchas de los peces dibujados por Sañez Reguart no son "suyas", al menos no todas. Se omite que el autor de la Instrucción real de 1776 fue Pedro Dávila, y que éste hizo figurar fósiles en el Catálogo de su colección, con la que se erigió el Real Gabinete. Los errores de impresión o transcripción son bastantes para hacerse notar. En fin, la obra podría haber sido algo más entera; pero es muy valiosa y clarificadora. (E. A.)

Coulomb

Ingeniero y físico

La gloire des ingenieurs. L'intelligence téchnique du xvie au xviiie siècle, por Hélène Vérin. Albin Michel; París, 1993.

L'oeuvre de deux physiciens: Coulomb (1736-1806), Foucault (1819-1868). AA.VV. Université de Nantes, 1994.

Restaging Coulomb. Usages, controverses et replications autour de la balance de torsion. Dirigido por Christine Blondel y Matthias Dörries. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 1994.

Macedonio Melloni: Carteggio (1819-1854). Edición preparada por Edvige Schettino. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 1994.

Charles A. Coulomb (1736-1806) entró, a los 23 años, en la Escuela de Ingeniería de Mézières, cuyo nivel de enseñanza superaba de lejos la formación ofrecida en otros centros civiles y militares. Los alumnos se beneficiaban de un claustro numeroso y avezado, en el que sobresalían Chastillon, du Vignau, Bossut y Nollet. En las clases teóricas se enseñaba aritmética, geometría, estática, dinámica, teoría de máquinas e hidrodinámica; en la clases prácticas, dibujo sobre el terreno, nivelación, fortificación y corte.

Mézières, embrión de la Escuela Politécnica, constituye un punto de inflexión en la escolarización de los ingenieros en Europa, eje de la transformación del continente según muestra Hélène Vérin en *La gloire des ingénieurs. L'intelligence téchnique du xvie au xviiie siècle*. Es el suyo un trabajo de historia social y económica, no exenta de pretensiones filosóficas. Aunque la importancia del ingeniero, del técnico en general, en el progreso se remonta siglos atrás, tradición que ya compilaron Herón de Alejandría y Filón de Bizancio, por no hablar de los árabes, la verdad es que en ese intervalo de trescientos años abarcados por Vérin la función estatal del ingeniero cobra carta de naturaleza. Los ingenieros están al servicio del príncipe, propio o ajeno. Luis de Foix trabaja para nuestro rey Felipe II en el Escorial y se encarga luego de las obras hidráulicas del monarca francés.

Desconocedora de las realizaciones de los ingenieros españoles del Renacimiento, Vérin concede privilegiada atención a la legión de italianos llamados a Francia a lo largo del XVI. El ingeniero es un matemático hábil, que domina la arquitectura militar, señala la plaza a tomar y descubre su flanco más débil; en la defensa, traza las trincheras, las galerías y las murallas. Para ello se apoya en la topografía y en la cartografía. A final del siglo con Jean Errard, Galileo y Simon Stevin, la ingeniería ha devenido un arte, la ciencia práctica de la fortificación. La habilidad artesanal deja paso al rigor geométrico, al cálculo. Se atraviesa una etapa intermedia donde los libros de ingeniería se presentan en forma de diálogo, a imagen del famoso de Domenico Mora *Tre quesiti in dialogo sobre il fare batterie, fortificare una città, et ordinare batagglia quadrate con una disputa di precedenza tra l'arme et le lettere*, donde se cotejan puntos de vista distintos.

A comienzos del siglo XVII, Stevin denunciará el carácter limitado y un tanto obtuso de la instrumentación de la matemática, degenerada en prontuario de recetas. Mayor reconocimiento merece, sin embargo, la elaboración de aparatos mecánicos y científicos. En la centuria siguiente, tiempo de clasificación de saberes, el ingeniero se libera de los compromisos militares y ofrece su capacidad técnica al mejor postor. Se abre paso en la minería y construcción naval. Para apuntalar los principios matemáticos, tiene en Leonhard Euler el modelo a seguir con su *Théorie complète de la construction et de la manoeuvre des vaisseaux, mise à la portée de ceux qui s'appliquent à la navigation.* Para apuntalar los principios físicos, el modelo a seguir es Coulomb.

Con el despacho de teniente, Coulomb recibe su primer destino en Brest, para ocuparse de la cartografía de la defensa de la costa atlántica. En 1764 se le envía a la Martinica, encargado de supervisar la fortificación de la isla. Madura allí sus ideas sobre la fuerza de presión y la estabilidad de las bóvedas, compiladas en su *Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture*, que lee en 1772 ante la Academia de Ciencias. El *Essai* es objeto de reimpresión y análisis en *L'Oeuvre de deux physiciens. Coulomb (1736-1806). Foucault (1819-1868).* La primera parte, que es la que nos interesa, contiene un artículo de Patricia Radelet-de-Grave y otro de Sylvie Provost.

Radelet-de-Grave desentraña la estructura del texto y subraya el nuevo método de cálculo de Coulomb. En la teoría de la estabilidad aquí propuesta convergen tres líneas principales: la estática, la elasticidad (deformaciones) y la resistencia de los materiales (rotura). En cada una de esas tres líneas, complementarias, se distingue la mecánica de la arquitectura. Coulomb desarrolla la parte arquitectónica de la estática (los teóricos más inmediatos de la misma serían Jacob Bernoulli, Euler y Aepinus) y la parte arquitectónica de la resistencia de materiales (esbozados sus principios por Jacob Bernoulli, Bülfinger y Musschenbroek). El texto coulombiano arranca de unas proposiciones preliminares sobre las ecuaciones fundamentales de la estática, para ocuparse en seguida de los conceptos de rozamiento, cohesión, rotura de los cuerpos, resistencia de los pilares de albañilería, presión de los terraplenes y bóvedas.

En el preámbulo de su teoría del empuje, Coulomb comienza por estudiar el caso de un pilar cargado de un peso P que tiende a romperse por deslizamiento de su parte superior a lo largo de una de sus secciones. Para que la columna no se rompa según determinada sección, es necesario que el peso P sea siempre inferior a una expresión donde intervengan los parámetros que definen la sección. Basta minimizar esta expresión para obtener la carga máxima que puede soportar el pilar. El método de los máximos y mínimos permite determinar los valores límite entre los que debe encerrarse la fuerza de presión. La eficacia del método en el cálculo de las bóvedas no se apreciará hasta los años veinte del siglo siguiente. Coulomb generaliza el enfoque a la evaluación de la eficacia óptima del trabajo humano, definido éste como el producto de la intensidad de la presión ejercida por la velocidad del punto de aplicación y el tiempo que dura el esfuerzo desplegado.

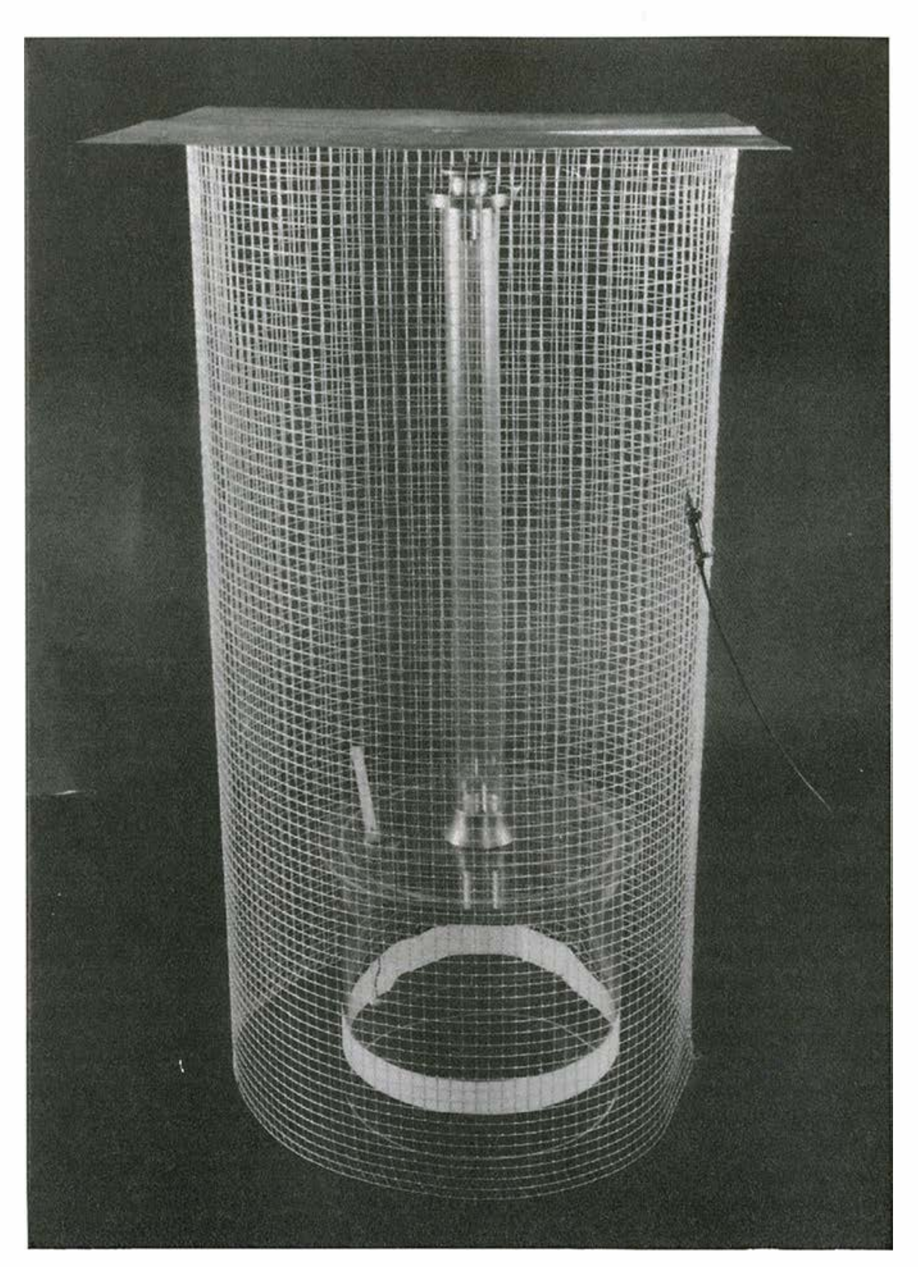
Sus memorias sobre electricidad y magnetismo comenzaron en 1777. Trabajó para cuantificar las leyes eléctricas y magnéticas, y apoyó la teoría newtoniana de las fuerzas centrales frente a la idea cartesiana de los vórtices. Con la balanza, la electricidad bascula en el dominio de la mecánica. Pero una mecánica científica, la de las medidas dinámicas y las ecuaciones diferenciales. En electricidad, determinó la ley cuantitativa de fuerzas, creó la noción de masa eléctrica y estudió la distribución superficial de la carga en los cuerpos conductores. En magnetismo, determinó la ley cuantitativa de fuerzas, estableció una teoría del magnetismo

basada en la polarización molecular e introdujo el concepto de desimantación.

Los físicos de su tiempo, divididos a propósito de las teorías sobre la electricidad, se ponen de acuerdo a la hora de criticar los instrumentos que miden sus efectos. No hay unanimidad en lo que se está midiendo: la *intensidad*, la *fuerza*, el *grado* o la *densidad* de la electricidad. Coulomb, con la balanza de torsión, limita su investigación a un número restringido de propiedades de la electricidad (su disipación y repartición geométrica). Su obra está sembrada de recomendaciones relativas a la escala de los dispositivos experimentales empleados o la duración óptima de los ensayos. "Los experimentos realizados en pequeño, en un gabinete de física, no bastan para dirigirnos en el cálculo de las máquinas destinadas a levantar pesos enormes", declara en el comienzo de su *Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages* (1781). Coulomb elaboraba su argumentación en un proceso de tres tiempos: preparación de los experimentos, realización de éstos y explicación.

Sylvie Provost estudia el establecimiento de la ley de la interacción eléctrica $1 / r^2$, enunciada en la *Première mémoire sur l'électricité et le magnétisme*: "La fuerza repulsiva de dos bolas eléctricamente cargadas de la misma naturaleza de electricidad se halla en razón inversa con el cuadrado de la distancia del centro de las dos bolas". Provost analiza la estructura interna del trabajo de Coulomb: separación entre modelo y realidad, determinación de la ley de fuerzas, semiperíodo de oscilación, teorema del momento cinético, alteración relativa ante el rozamiento de un fluido, leyes de la fuerza de torsión, comparación entre experimentos y conclusión general. Desde una perspectiva metacientífica, engarza axiomas, conceptos, prueba experimental y multiplicidad de hechos.

Con otro criterio, menos teñido de abstracción, Peter Heering narra su replicación del experimento de la balanza de torsión, la ley del inverso del cuadrado y su refutación por los físicos alemanes de comienzos del XIX en *Restaging Coulomb. Usages, controverses et réplications autour de la balance de torsion*. La ley eléctrica del inverso del cuadrado se había propuesto en repetidas ocasiones a lo largo del XVIII. Joseph Priestley, Henry Cavendish y Charles Stanhope la habían formulado a partir de consideraciones teóricas. Parecía muy plausible, dada su manifiesta similaridad con la ley newtoniana del inverso del cuadrado de la gravedad. Coulomb avanzó un paso más, un doble experimento para demostrarla: el de la balanza de torsión (memoria primera) y el de la medición del período de las oscilaciones de una aguja cargada (memoria segunda). Para Coulomb, sus contemporáneos y la historia subsiguiente, el experimento de la balanza de torsión fue el más importante, y es el que replica Heering.



Replicación de una balanza de torsión dentro de una jaula de Faraday

La balanza de torsión de Coulomb constaba de un cilindro de vidrio, cubierto por una placa vítrea con dos aberturas. En el centro de la placa, y por uno de los orificios, se introducía un tubo, a cuyo extremo superior se había fijado un micrómetro de torsión y en el extremo inferior un hilo de plata. Servía de peso un cilindro de cobre, prendido del extremo inferior del hilo para asegurar la tensión necesaria. Horizontal al peso, había una aguja de hilo de seda empapado en cera. En una punta, la aguja portaba una pelota de médula vegetal; por la otra punta sostenía un papel que, en función de contrapeso, amortiguaba también las oscilaciones. En la segunda abertura de la placa se insertaba un cilindro delgado, no conductor, que llevaba en su extremo una segunda bola de médula vegetal de idéntico diámetro que la primera. Esta bola se situaba en la posición que ocupaba la bola móvil cuando el alambre se enderezaba de su torcimiento. Adosada al cilindro de vidrio, y a la altura de

la aguja, había una cinta de papel escalonada en grados.

De partida, las dos bolas están en contacto. Se cargan eléctricamente con un conductor, que se retira a continuación. Puesto que las cargas de las dos bolas son del mismo signo, sale repelida la bola móvil. Se lee su posición de equilibrio, una vez terminadas las oscilaciones (que suelen durar un minuto). Con el micrómetro se incrementa luego la torsión del filamento para acercar entre sí las dos bolas. La repulsión electrostática entre las bolas se cancela con la torsión del alambre de plata. La fuerza de torsión es proporcional al ángulo de torsión, permitiéndonos así determinar la relación entre la fuerza eléctrica y la distancia que separa las cargas.

La replicación de Heering no fue fácil. Los problemas técnicos de la replicación de la balanza de torsión derivan de las pequeñísimas fuerzas que hay que medir. Para una torsión de 360 grados, Coulomb indicaba una fuerza "de 1/340 de granos", unos 18,7 nN. Heering no pudo obtener la ley de Coulomb sin incluir la balanza dentro de una camisa o jaula de Faraday.

En París, el trabajo de Coulomb responde a una visión compartida de la ciencia que busca leyes universales basadas en el orden y la regularidad de la naturaleza, como defiende Cassini, uno de los primeros beneficiados de la balanza magnética de torsión. Quienes no comulgan con ese credo, como Deluc en Inglaterra o Volta en Italia, verán en el experimento de Coulomb un fenómeno compuesto y no un fenómeno simple que corrobore ninguna ley. Los físicos alemanes aceptaron en un comienzo la ley del inverso del cuadrado, que, sin embargo, pondrían más tarde en cuestión, para acabar abrazándola definitivamente.

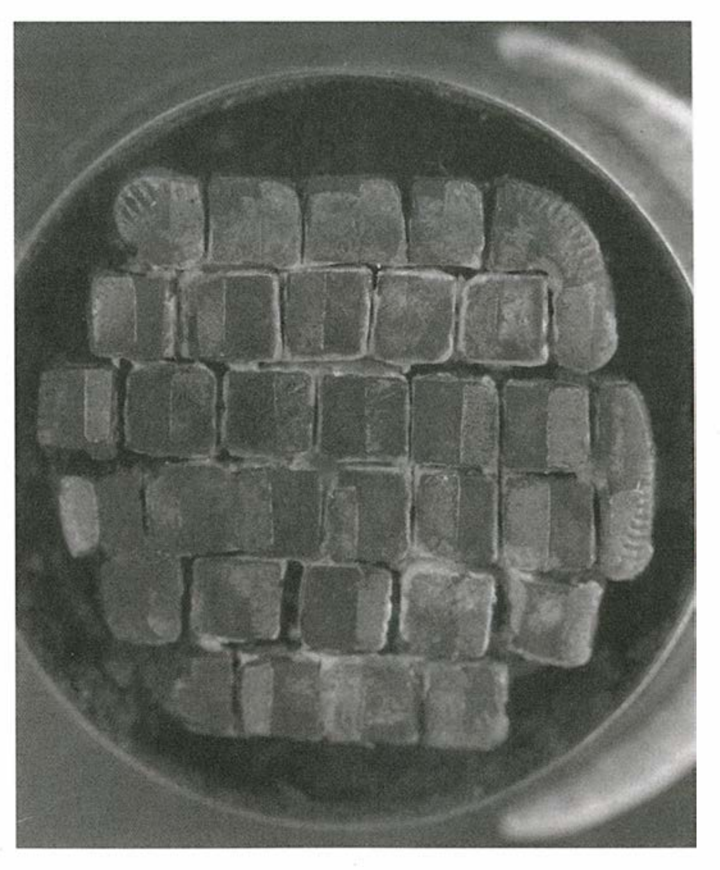
A finales de los años veinte, en efecto, volvió a imponerse la ley de Coulomb. Con una larga proyección. A modo de ejemplo de su influencia, podemos escoger un físico italiano, Macedonio Melloni (1798-1854), cuyo *Carteggio* acaba de publicar su estudiosa más tenaz, Edvige Schettino. Melloni fue, desde 1824 hasta 1830, profesor de física en la Universidad de Parma, donde combinaba las clases teóricas con demostraciones de laboratorio. "Las aplicaciones de las ciencias físicas pueden describirse, pero los principios fundamentales conviene demostrarlos", dirá explícitamente. Traba por entonces amistad con Leopoldo Nobili, famoso por haber ideado un nuevo medidor de corriente, el galvanómetro astático, que empleaba una suspensión de dos agujas imantadas.

El ingenio de Nobili en la construcción de instrumentos de gran sensibilidad influyó en Melloni. Con la invención de un termómetro electromagnético mucho más sensible que el termómetro de Bregeut, se proponía medir la temperatura de un cuerpo aprovechando la fuerza electromotriz que se genera en los extremos de una termopila; para ello unió los extremos de la termopila a los bornes de un galvanómetro astático.

Las modificaciones que Melloni incorporó en este termomultiplicador mejoraron la celeridad y la sensibilidad. En él se fundaron las bases para una investigación sistemática sobre las leyes de transmisión y absorción de la radiación térmica. Bajo la dirección de Melloni se construyeron muchos ejemplares que fueron adoptados por Faraday, Forbes, Henry, de la Rive, Giorgi, Garibaldi y otros. La termopila persistió durante el siglo XIX.

En 1833, presentó ante la Academia de Ciencias de París, donde residía en forzado exilio, su primer gran trabajo sobre el calor radiante: *Mémoire sur la transmission libre de la chaleur rayonnante par différents corps solides et liquides*. Enriqueció este ensayo con otros resultados, publicados al año siguiente en una nueva memoria: *Nouvelles recherches sur la transmission immédiate de la chaleur rayonnante par différents corps solides et liquides*. En la primera memoria, sirviéndose de una lámpara de Argand, examinaba la parte de radiación transmitida a través de diversas pantallas interpuestas entre la fuente y el termomultiplicador, que desempeñaba la función de detector térmico. En la segunda memoria, analizaba el comportamiento sirviéndose de otros fuentes. Mediante fuentes no monocromáticas la radiación que se transmitía sufría el fenómeno de la dispersión.

Consagró a la teoría de la *inducción electrostática* el último año de su vida. Retomando en parte la teoría de electricidad atmosférica, publicó en 1854 cuatro trabajos sobre el tema. En la carta 205 Melloni informó a Faraday de sus estudios relativos al comportamiento de una carga sobre la superficie de un conductor. Aceptaba la teoría de los dos tipos de electricidad o "principios eléctricos". Según Melloni estos dos "principios eléctricos" en un conductor aislado eran libres, pero en presencia de un cuerpo electrizado se convertían en "uno libre y otro disimulado". Para explorar esta electricidad "simulada" —privada de capacidad inductiva— hizo construir un electroscopio fundado sobre un principio distinto del tradicional electroscopio de laminillas. Por su elevada sensibilidad y capacidad de mantener largamente la carga eléctrica, Melloni podía explorar, en las diversas partes del cuerpo inducido, los efectos de la inducción incluso después de que se hubiera retirado el cuerpo inductor. Confiesa que su distancia del modelo de Coulomb es más aparente que real. (L. A.)



Detalle de una de las dos caras de la termopila

Especiación

Cromosómica

SPECIES EVOLUTION. THE ROLE OF CHROMOSOME CHANGE, por Max King, Cambridge University Press. Cambridge, 1993.

En una línea pragmática, el autor considera necesario un concepto de especie que satisfaga los diferentes requerimientos de la comunidad científica, integrada por paleontólogos, genéticos, sistemáticos, ecólogos, etc. Pero es aquí donde comienzan las dificultades, derivadas de los diferentes conceptos de especie: biológicos, evolutivos, ecológicos y filogenéticos. No plantea otras dificultades más fundamentales, las que surgen al formular un concepto de especie universal, que abarque todas las situaciones que presenta la variabilidad de los seres vivos. La especiación, como otros aspectos de la evolución, es un proceso histórico, que depende de muchos factores, y debe estudiarse a partir de datos obtenidos en la naturaleza. Pero los conocimientos extraídos de los estudios de campo no facilitan un concepto único de especie, que sea formalmente riguroso y, al mismo tiempo, válido en todas las situaciones.

Analiza los distintos modelos de especiación, ponderando la validez general de los mecanismos que se proponen en cada uno. Su opinión sobre el papel de la poliploidía en la especiación coincide con la de la mayoría de los autores. La considera el modo de especiación dominante en las plantas. Entre el 70 % y el 80 % de las angiospermas tendrían un origen poliploide, mientras que en los animales su papel sería mucho menor.

Dejando aparte la poliploidía, la de que las nuevas especies se originen a partir de poblaciones alopátricas respecto a las de la especie materna es condición necesaria para la especiación cromosómica. También cree obligado que dichas poblaciones sean pequeñas. El requerimiento de que las mutaciones cromosómicas responsables de la especiación se fijen, haría indispensables estas dos condiciones. Si la población de la nueva especie crece después de la fijación de estos cambios cromosómicos y entra en contacto con la población materna, la heterosis negativa y las barreras de esterilidad en la F_2 y en los retrocruzamientos mantendrían su independencia. Si se establece una zona híbrida, ésta sería un filtro que impediría el flujo genético.

En el proceso de especiación cromosómica, la diferenciación genética y morfológica tendría lugar en el proceso de expansión de la población inicial. Alternativamente, esta diferenciación también podría iniciarse en pequeñas poblaciones aisladas de la especie incipiente. Argumenta que es difícil que un polimorfismo cromosómico constituido por reordenaciones equilibradas, sin efectos sobre la fertilidad en la población paterna, pase a estar formado por reordenaciones con heterosis negativa, que determinen barreras de esterilidad en la población hija.

Al tratar de la fijación de las reordenaciones cromosómicas en las poblaciones, defiende que no puede ignorarse que éste es un mecanismo evolutivo importante. No obstante, en mi opinión, aunque pueda tener importancia en algún caso concreto de evolución cromosómica, quizás antes de atribuirle alcance evolutivo general sería más prudente esperar a disponer de más casos estudiados.

Al hablar de la especiación alopátrica, presenta el modelo básico de la teoría sintética de la evolución, de diferenciación gradual de poblaciones alopátricas, y analiza algunas de sus variantes. También trata de la especiación por revoluciones genéticas originadas por efecto fundador. Se ocupa de las propiedades y efectos de las mutaciones cromosómicas que tienen implicaciones en la especiación. También de las clases de cambios cromosómicos, de su relación con la eficacia biológica y del impacto de la heterocigosis estructural en la fertilidad y en la viabilidad. Se detiene en el alcance de la diferenciación genética y la estructural en la especiación.

Presta especial atención a los efectos de los elementos transponibles, aunque sólo les deja una puerta abierta para actuar en la especiación cromosómica: que estos elementos se movilicen en los cuellos de botella de las poblaciones fundadoras. Las indicaciones existentes de que la consanguinidad puede determinar incrementos de esta movilización están en favor de esta posibilidad.

Termina insistiendo en algunos aspectos de la especiación cromosómica desde un punto de vista general; por ejemplo, sobre las dificultades que se presentan para averiguar si en la especiación se produce primero la diferenciación cromosómica o la génica. No olvida las implicaciones de la especiación cromosómica en la teoría de los equilibrios interrumpidos. King presenta algunas dificultades de esta teoría, como las que se derivan de la imposibilidad de detectar en los fósiles los caracteres distintivos de muchas especies y que la mayoría de los cambios morfológicos no dependan de grandes mutaciones. Pero acepta que la evolución por explosiones de especiación que da lugar a los equilibrios interrumpidos queden como una hipótesis atractiva. (A. P.)





La poliploidía constituye el mecanismo de especiación dominante en las plantas. Arriba aparecen dos especies de un mismo género: Tilia euchlora (izquierda) *y* Tilia tomentosa (derecha)



John Timpane

Cómo convencer a un científico renuente

Al final de las razones viene la persuasión.
—Ludwig Wittgenstein, *Sobre la certeza*

Al final de toda argumentación bien construida, sin que importe cuán evidente o poderoso sea el razonamiento, la persona a la que se trata de convencer ha de dar un salto hacia la aceptación. ¿Qué es lo que hace que un argumento científico sea persuasivo? Por descontado que no hay una nación llamada "ciencia", sino una manada de tribus con sus respectivas artesanías. Tal vez el cosmólogo mueva escéptico la cabeza y el ingeniero químico se sienta violento, si alguien arguye que, para que lo observado tenga sentido, *debe* existir lo inobservado. Ciertas ramas de la física exigen la reproducibilidad, pero al antropólogo quizá se le presente tan sólo una única ocasión de vivir entre los !kung.

Hay algunos factores de convicción básicos que son más o menos conocidos, más o menos estimados. Los cinco elementos que según Robert K. Merton integran el trabajo científico —originalidad, distanciamiento, universalidad, escepticismo y pública accesibilidad— desempeñan todos ellos algún papel. Si los resultados y los métodos siguen las reglas consabidas y si vemos que se dan la imparcialidad y la comprobabilidad esperadas, por lo menos nos acercamos bastante a sentirnos bien dispuestos. Pero el convencimiento, lo mismo en el terreno científico que en cualquier otro, implica el juego de distintas fuerzas, tanto de la razón como de la sinrazón.

Nuestro sentido de lo que conecta, de lo que cuadra, de lo que se relaciona o se deriva, puede a menudo movernos a la aceptación. Los resultados que no se ajustan al trabajo existente nos suelen convencer poco. Pero si un estudio A establece conexiones entre los estudios B, K y S, o si ese estudio ilumina con nueva luz un hecho comprobado, cabe que se produzca una pequeña epifanía...

O una enorme. Sir Isaac Newton impresionó mucho a su audiencia cuando de las observaciones hechas por Galileo dedujo sus famosas leyes físicas, pero la llevó ya al colmo del asombro cuando demostró después que la Luna, los planetas y las estrellas se ajustaban a aquellos mismos principios. No menos pasmosa fue la noticia de que la estructura del ADN propuesta por James D. Watson y Francis Crick ayudaba a explicar el mecanismo de copia del material genético. La correlación puede funcionar también desde fuera: si caemos en la cuenta de que el argumento que acabamos de oír es corroborado por otra prueba independiente de él, quizá se nos empiecen a remover nuestros personales paradigmas.

Para conseguir, pues, convencer, sólo habrás de ser original hasta cierto punto. Una total originalidad, tanta que ninguna otra persona hable tu lenguaje, impedirá que tu argumento se abra camino en el mundo (como le ocurrió al comienzo a Thomas Young con su teoría ondulatoria de la luz). Llamemos a esto "Ley de la Obviedad": mejor es dar medio paso hacia delante y que te entiendan, que dar un paso entero y que te ignoren.

También el prestigio vende. Freeman Dyson ha hecho notar las "profundas consecuencias" que tiene la situación del experto en la comunidad científica. Un equipo famoso que trabaje en una institución famosa sostenido por una sólida fuente de recursos financieros es toda una combinación difícil de resistir. La publicidad genera prestigio. Los científicos necesitan ser auténticos maestros organistas ante los enormes teclados de los medios de comunicación. El aparecer en público fomenta el debate, impulsa la competencia, atrae fondos.

Son numerosos los científicos que a argumentos que nunca han leído ni oído les prestan crédito simplemente porque la mayoría de sus colegas los dan por buenos. Como escribe Thomas S. Kuhn, "no hay criterio superior al consenso de la comunidad de los entendidos. El transferir la confianza de un paradigma a otro es una experiencia de conversión que no puede ser forzada".

Y a veces la pura belleza de una demostración puede hacer que un argumento resulte del todo convincente. La einsteiniana teoría especial de la relatividad se ganó la aceptación no sólo porque podía explicar fenómenos bien observados, sino también por la elegante sencillez de la ecuación $E = mc^2$.

Mucho de lo que hace que un argumento científico convenza depende, en definitiva, de cosas que no son ciencia. Al decir esto, no pretendemos impugnar o socavar las ciencias, sino más bien reconocer su humanidad. Hay pensadores posmodernos —por ejemplo los que practican el conjunto de métodos llamado "deconstrucción"— que consideran escandaloso que lo no racional tenga en las ciencias un papel importante, cuando, de hecho, ese papel les es familiarísimo a todos los que viven dedicados realmente a alguna ciencia.

Además, la importancia de semejantes problemas conceptuales disminuye mucho en cuanto se entra en el laboratorio, cuya puerta da acceso a un mundo de prioridades diferentes. En su lugar de trabajo, los científicos tienen plena fe en la realidad del mundo y en sí mismos. Les es necesario tenerla. (De lo contrario, sus experimentos y quizás ellos mismos pueden hundirse en el fracaso.) Por otra parte, el orden de la realidad les obliga a tratar todos los datos, especialmente los suyos propios, con un profundo escepticismo. Al fin y a la postre, estos escépticos realistas, ingenuos y pragmáticos, habrán de someter sus descubrimientos a otra entidad en la que confían —al cándido y contundente mecanismo de una revista especializada.

¿Cómo se desarrolla, pues, *de facto*, la historia de la ciencia? ¿Conforme a la razón, atraída de manera inevitable por el magnetismo de la verdad? ¿O en forma de ráfagas, a saltos, con súbitas disyunciones no racionales? Tal vez esto segundo equivalga a lo primero, puesto que las miríadas de momentos no racionales —en los que los científicos son individualmente persuadidos, convencidos, convertidos— vienen a ser, en suma, como una especie de progreso. La conversión ocurre cuando una pieza, cayendo en el lugar conveniente, le da a todo el *puzzle* un sentido nuevo. A menudo la nueva visión es tan fuertemente coercitiva, que nuestra decisión de aceptar no parece ni siquiera decisión. Sin embargo, siempre hay una decisión. Precisamente por no ser racionales, esos saltos —desde el último témpano de hielo hasta la firme orilla acogedora— son profunda y maravillosamente humanos.